

**PENGARUH CARA PENCAAMPURAN GLISERIN, ASAM NITRAT
DAN ASAM SULFAT DI *HELE SHAW CELL* TERHADAP
INTERFACIAL INSTABILITY PADA PEMBUATAN
NITROGLISERIN**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

HENDRI ARIFUL ANSORI

NIM. 0810620063-62

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2012**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH CARA PENCAMPURAN GLISERIN, ASAM NITRAT
DAN ASAM SULFAT DI HELE SHAW CELL TERHADAP
INTERFACIAL INSTABILITY PADA PEMBUATAN
NITROGLISERIN**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :
HENDRI ARIFUL ANSORI
NIM. 0810620063-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. ING Wardana, M.Eng., Ph.D.
NIP. 19590703 198303 1 002

Dr.Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.
NIP. 19750702 200003 2 001

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH CARA PENCAMPURAN GLISERIN, ASAM NITRAT
DAN ASAM SULFAT DI *HELE SHAW CELL* TERHADAP
INTERFACIAL INSTABILITY PADA PEMBUATAN
NITROGLISERIN**

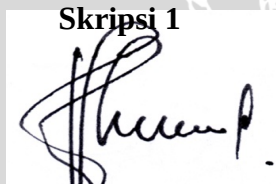
**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :
HENDRI ARIFUL ANSORI
NIM. 0810620063-62

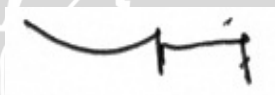
Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 14 Juni 2012

Skripsi 1



Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT.
NIP. 19680324 199412 1 001

Skripsi 2



Dr. Ir. Achmad As'Ad Sonief, MT.
NIP. 19591128 198710 1 001

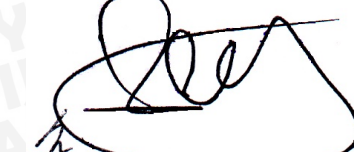
Komprehensif



Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE
NIP. 19670923 199303 1 002

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 19720903 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, atas segala limpahan rahmat-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Cara Pencampuran Gliserin, Asam Nitrat dan Asam Sulfat Di *Hele Shaw Cell* Terhadap *Interfacial Instability* Pada Pembuatan Nitrogliserin”. Dalam pembuatan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua, kakak dan adik saya yang telah memberikan dorongan, semangat dan mendo’akan saya.
2. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., M.T. selaku Ketua Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng. selaku Sekretaris Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya Malang.
4. Ibu Dr.Eng. Lilis Yuliaty, ST., MT. selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konversi Energi, Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng, Ph.D selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Dr.Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT. (selaku dosen penguji skripsi 1), Dr. Ir. Achmad As`Ad Sonief, MT. (selaku dosen penguji skripsi 2) dan Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE. (selaku dosen penguji komprehensif) yang telah memberikan masukan-masukan serta penyempurnaan dalam penyusunan skripsi ini.
7. Bapak Dr.Eng. Yudi Surya Irawan, ST., M.Eng. selaku Dosen Wali.
8. Bapak Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., M.Eng. selaku Kalab STUDIO PERANCANGAN DAN REKAYASA SISTEM.
9. Seluruh Staf Pengajar yang saya hormati.
10. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
11. Seluruh sahabat KBMM Universitas Brawijaya khususnya Keluarga Besar EMPEROR.
12. Seluruh asisten STUDIO PERANCANGAN DAN REKAYASA SISTEM “Mas Sadat, Mas Angga, Mbak Wida, Mbah Alif, Mas Ulin, Mas Kabul, Mas Aryo, Okky, Bahrudin, Ike, Fahmi, Basuki, Tri, Fauzan, Redi, Agus dan Puspita” yang

telah memberikan semangat, do'a dan motivasi serta dukungan dalam menyelesaikan skripsi.

13. Serta semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Tiada gading yang tak retak, begitu juga halnya dengan skripsi ini yang masih banyak ditemukan kekurangan-kekurangan. Oleh sebab itu, penulis menerima masukan, saran, atau pun kritik yang sifatnya membangun dari semua pihak untuk penyempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi masyarakat khususnya para akademisi.

Malang, Juni 2012

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
DAFTAR SIMBOL	ix
RINGKASAN	x
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 4
2.1 Penelitian Sebelumnya	4
2.2 Fluida	5
2.3 Viskositas	6
2.4 Tegangan Permukaan	8
2.5 Difusi	10
2.6 Gliserin	10
2.7 Asam Nitrat	11
2.8 Asam Sulfat	12
2.9 Pembuatan Nitrogliserin	13
2.10 Ketidakstabilan Antarmuka (<i>Interface Instability</i>)	14
2.11 <i>Hele Shaw Cell</i>	17
2.12 Hipotesa	18
 BAB III METODE PENELITIAN	 19
3.1 Metode Penelitian	19
3.2 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	19
3.3 Variabel Penelitian	19

3.4	Bahan dan Peralatan Penelitian.....	20
3.5	Instalasi Penelitian.....	23
3.6	Prosedur Pengambilan Data	23
3.7	Diagram Alir Penelitian.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		27
4.1	Hasil.....	27
4.2	Pembahasan.....	27
4.2.1	Visualisasi bentuk <i>interfacial instability</i> pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam <i>hele shaw cell</i>	27
4.2.2	Keliling bidang kontak campuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat dalam <i>hele shaw cell</i> pada akhir injeksi.....	30
4.2.3	Hubungan antara jari-jari dalam <i>viscous finger</i> dengan waktu pembentukan pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam <i>hele shaw cell</i>	32
4.2.4	Hubungan antara jari-jari luar <i>viscous finger</i> dengan waktu pembentukan <i>viscous finger</i> pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam <i>hele shaw cell</i>	34
4.2.5	Hubungan antara keliling bidang kontak <i>viscous finger</i> terhadap lebar <i>viscous finger</i> rata-rata (W_0 rata-rata) pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam <i>hele shaw cell</i>	36
4.2.6	Perubahan bentuk daerah reaksi pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam <i>hele shaw cell</i>	38
BAB V PENUTUP.....		44
5.1	Kesimpulan.....	44
5.2	Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Hal.
Gambar 2.1	Deformasi yang disebabkan oleh gaya geser.....	5
Gambar 2.2	Fluida newtonian dan fluida non-newtonian.....	6
Gambar 2.3	Aliran viscous.....	6
Gambar 2.4	Viskositas kinematik berbagai fluida pada 1 atm.....	7
Gambar 2.5	Perubahan tekanan di antarmuka melengkung karena tegangan permukaan: (a) dalam silinder (b) cairan di dalam tetesan bola (c) antarmuka melengkung umum.....	8
Gambar 2.6	Gaya adhesi (a) dan kohesi (b).....	9
Gambar 2.7	Pergerakan larutan dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah....	10
Gambar 2.8	Reaksi nitration gliserin.....	13
Gambar 2.9	<i>Viscous finger</i>	15
Gambar 2.10	Proses terbentuknya percabangan.....	15
Gambar 2.11	<i>Hele shaw cell</i> horisontal dengan injeksi.....	17
Gambar 2.12	Gambar dari tipe <i>hele-shaw cell</i> (a) Tipe Radial; (b) Tipe Lateral....	17
Gambar 2.13	Bentuk umum radial <i>viscous finger</i>	18
Gambar 2.14	<i>Viscous finger</i> lateral <i>hele-shaw cell</i>	18
Gambar 3.1	<i>Hele shaw cell</i>	20
Gambar 3.2	<i>Syringe pump</i>	21
Gambar 3.3	Kamera digital.....	21
Gambar 3.4	Gelas ukur.....	22
Gambar 3.5	<i>Stopwatch</i>	22
Gambar 3.6	Saluran injektor.....	23
Gambar 3.7	Rangkaian alat uji penelitian.....	23
Gambar 3.8	Aplikasi <i>free studio manager</i>	24
Gambar 3.9	Aplikasi <i>AUTO CAD</i>	25
Gambar 3.10	Diagram alir penelitian.....	26
Gambar 4.1	Grafik hubungan jari-jari dalam <i>viscous finger</i> terhadap waktu pembentukan <i>viscous finge</i>	32
Gambar 4.2	Grafik hubungan jari-jari luar <i>viscous finger</i> terhadap waktu pembentukan <i>viscous finger</i>	34

Gambar 4.3	Grafik hubungan keliling bidang kontak <i>viscous finger</i> terhadap lebar <i>viscous finger</i> rata-rata.....	36
Gambar 4.4	<i>Instability wave-length</i> /panjang gelombang kritis.....	37
Gambar 4.5	Grafik hubungan luas daerah reaaksi gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat terhadap waktu.....	42
Gambar 4.6	Grafik hubungan luas daerah reaksi terhadap waktu.....	42



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Hal.
Tabel 4.1	Visualisai pembentukan <i>interfacial instability</i> (<i>viscous finger</i>) dan jari-jari <i>viscous finger</i> pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam <i>hele shaw cell</i>	28
Tabel 4.2	Properties fluida pada <i>hele shaw cell</i> saat 25°C 100kPa.....	29
Tabel 4.3	Keliling bidang kontak campuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat pada akhir penginjeksian $t = 10$ detik	30
Tabel 4.4	Perubahan bentuk daerah reaksi pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam <i>hele shaw cell</i>	39
Tabel 4.5	Visualisasi bentuk daerah reaksi gliserin + asam nitrat diinjeksi asam.....	41

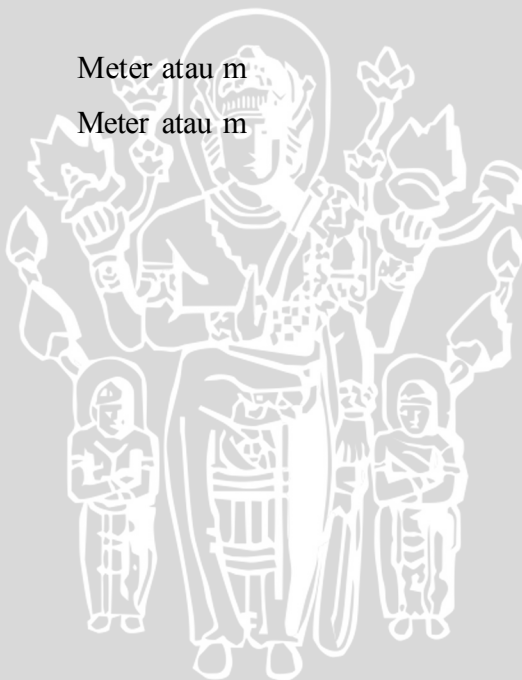


DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Sifat-sifat gliserin
Lampiran 2	Sifat-sifat asam nitrat
Lampiran 3	Sifat-sifat asam sulfat
Lampiran 4	Sifat-sifat nitrogliserin
Lampiran 5	Cara <i>Converter File Video To JPG</i>
Lampiran 6	Cara pengukuran dengan menggunakan software AUTOCAD
Lampiran 7	Visualisai pembentukan <i>interfacial instability (viscous finger)</i> dalam <i>hele shaw cell</i> gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat
Lampiran 8	Visualisai pembentukan <i>interfacial instability (viscous finger)</i> dalam <i>hele shaw cell</i> gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat
Lampiran 9	Visualisai pembentukan <i>interfacial instability (viscous finger)</i> dalam <i>hele shaw cell</i> gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat
Lampiran 10	Keliling bidang kontak campuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat pada akhir penginjeksian $t = 10$ detik
Lampiran 11	Visualisai pembentukan <i>interfacial instability (viscous finger)</i> dalam <i>hele shaw cell</i> gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat
Lampiran 12	Visualisai pembentukan <i>interfacial instability (viscous finger)</i> dalam <i>hele shaw cell</i> gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat
Lampiran 13	Visualisai pembentukan <i>interfacial instability (viscous finger)</i> dalam <i>hele shaw cell</i> gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat
Lampiran 14	Reaksi kimia pencampuran gliserin + asam nitrat, gliserin + asam sulfat dan asam nitrat + asam sulfat

DAFTAR SIMBOL

Besaran Dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Viskositas kinematik	Meter kuadrat per second atau m^2/s	ν
Viskositas dinamik	Newton second per meter kuadrat atau $\text{N.s}/\text{m}^2$	μ
Densitas / massa jenis	Kilogram per meter kubik atau kg/m^3	ρ
Tegangan permukaan	Newton per meter atau N/m	γ
Gaya (<i>Force</i>)	Newton atau N	F
Panjang	Meter atau m	L
Vecepatan perambatan	Meter per second atau m/s	V
Panjang gelombang kritis (<i>instability wave-length</i>)	Meter atau m	λ_c
Lebar celah antar plat	Meter atau m	b
Lebar <i>finger</i>	Meter atau m	W_0



RINGKASAN

Hendri Ariful Ansori, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang, Juni 2012, *Pengaruh Cara Pencampuran Gliserin, Asam Nitrat Dan Asam Sulfat Di Hele shaw cell Terhadap Interfacial instability Pada Pembuatan Nitrogliserin*, Dosen Pembimbing : I.N.G. Wardana dan Lilis Yuliati.

Nitrogliserin merupakan salah satu bahan dasar dari propelan. Nitrogliserin dapat dibuat dengan mereaksikan gliserin ($C_3H_5(OH)_3$) dengan asam nitrat (HNO_3) serta asam sulfat (H_2SO_4) sebagai katalisator. Salah satu faktor yang mempengaruhi keefektifan pembuatan nitrogliserin adalah cara pencampuran antara gliserin, asam nitrat dan asam sulfat. Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh cara pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat sebagai katalis terhadap ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*).

Metode penelitian yang akan digunakan adalah variasi pencampuran antara gliserin, asam nitrat dan asam sulfat yaitu dengan metode atau urutan : gliserin dan asam nitrat diinjeksikan dengan asam sulfat, gliserin dan asam sulfat diinjeksikan dengan asam nitrat serta gliserin diinjeksikan dengan asam sulfat dan asam nitrat yang dicampurkan pada *hele shaw cell*. Parameter ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*) yang diteliti adalah bentuk *finger*, panjang jari-jari *viscous finger*, keliling bidang kontak dan luas daerah reaksi.

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa proses difusi berjalan seiringan dengan penginjeksian larutan kedalam *hele shaw cell*, sehingga dapat diketahui jika proses difusi berjalan dua arah yaitu antara larutan yang diinjeksikan dengan larutan yang berada dalam *hele shaw cell*. Pada cara pencampuran ini, jari-jari dalam yang terpanjang sampai jari-jari dalam yang terpendek adalah gliserin dan asam nitrat diinjeksi asam sulfat, gliserin dan asam sulfat diinjeksi asam nitrat serta gliserin diinjeksi asam nitrat dan asam sulfat. Namun, untuk jari-jari luar yang terpendek sampai yang terpanjang adalah gliserin dan asam sulfat diinjeksi asam nitrat, gliserin dan asam nitrat diinjeksi asam sulfat serta gliserin diinjeksi asam nitrat dan asam sulfat. Pada cara pencampuran gliserin diinjeksi asam nitrat dan asam sulfat terjadi pembentukan ion NO_2^+ (nitronium ion) dan air, sehingga pembentukan air akan menghambat NO_2^+ untuk bereaksi karena akan mengencerkan reaktan. Namun, apabila NO_2^+ yang bersifat reaktif bertemu dengan $C_3H_5(OSO_3H)_3$ akan memacu reaksi berlangsung lebih cepat dan ini terjadi pada cara pencampuran gliserin dan asam nitrat diinjeksi asam sulfat.

Kata kunci : cara pencampuran, *interfacial instability*, *hele shaw cell*, laju reaksi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Saat ini kebutuhan nitroglicerine di Indonesia besarnya $\pm 657,89$ ton/tahun dan diperoleh dari luar negeri. Karena nitroglicerine merupakan bahan strategis, maka BPPIT Dephankam merasa perlu untuk memikirkan pengadaannya di dalam negeri. Selain itu, nitroglicerine merupakan senyawa kimia yang mempunyai prospek besar untuk dikembangkan secara komersial. Nitroglicerine bisa digunakan sebagai obat-obatan dan sebagai bahan peledak. Sebagai bahan obat misalnya, nitroglicerine digunakan sebagai obat untuk meredakan rasa sakit dan mengurangi frekuensi serangan angina pectoris. Sedangkan jika digunakan sebagai bahan peledak, nitroglicerine termasuk bahan peledak tingkat tinggi (*high explosive*) yang biasa dipakai sebagai bahan peledak di dalam dinamit dan propelan jenis *double base* dan *triple base*. Selain sebagai bahan obat dan bahan peledak, nitroglicerine juga dapat dipakai dalam bidang-bidang lain semisal bidang pertambangan maupun bidang farmasi, baik sebagai bahan pembantu maupun bahan baku.

Nitroglicerine dapat dihasilkan dengan mereaksikan gliserin (gliserol) dengan asam nitrat, proses ini disebut proses nitrasi. Reaksi ini merupakan reaksi esterifikasi, yaitu reaksi antara alkohol dan asam. Pada saat ini yang biasa digunakan sebagai *nitrating agent* adalah campuran asam nitrat dan asam sulfat. Reaksi nitrasi gliserol merupakan reaksi yang sangat berbahaya karena terjadi sangat cepat dan sangat eksotermik. Kondisi ini mengakibatkan kenaikan temperatur yang cepat dan sangat potensial untuk terjadinya ledakan jika tidak terkontrol. Hal ini ditunjukkan oleh beberapa penelitian (Biastruti, 1985; Badger Army Ammunition Plant, 2002) yang menunjukkan banyak kecelakaan yang terjadi didalam proses pembuatan nitroglicerine sehingga resiko yang tinggi dalam proses manufaktur ini tidak dapat diabaikan.

Untuk membuat proses yang aman dan efisien pada pembuatan nitroglicerine akibat reaksi nitrasi gliserol, maka hal ini sangat penting untuk dipelajari baik dari parameter-parameter reaksi dan juga perilaku reaksi tersebut. Salah satu perilaku reaksi yang sangat berpengaruh di dalam proses nitrasi gliserol adalah ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*) antara asam nitrat dan asam sulfat dengan gliserin. Ketidakstabilan tersebut akan membentuk sebuah *viscous finger* yang menyebabkan permukaan bidang kontak antara gliserin dengan asam nitrat maupun asam sulfat

semakin besar. Dengan membesarnya bidang kontak antara gliserin dengan asam nitrat dan asam sulfat maka proses pencampuran akan semakin sempurna dan reaksi kimia akan berjalan lebih efektif.

Pada penelitian sebelumnya (Egah, 2009) dibuat sebuah model aliran dalam *hele shaw cell* yaitu sebuah alat yang terdiri dari dua plat yang terpisah dengan jarak yang kecil dan didalamnya terdapat gliserin yang akan diinjeksi dengan asam sulfat dan asam nitrat. Tujuannya untuk mengetahui pengaruh perbandingan konsentrasi asam nitrat dan asam sulfat terhadap ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*). Sedangkan parameter-parameter reaksi dan juga perilaku reaksi sangat dipengaruhi oleh temperatur reaktor, kecepatan aliran penambahan gliserin dan pengadukan atau pencampuran ketiga unsur tersebut.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang cara pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat sebagai katalis yang dicampurkan pada *hele shaw cell* untuk mengetahui ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat diambil rumusan masalah yang diteliti yaitu bagaimanakah pengaruh cara pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat sebagai katalis yang dicampurkan pada *hele shaw cell* terhadap ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*)?

1.3 Batasan Masalah

Untuk lebih memfokuskan masalah, maka dalam penelitian ini digunakan beberapa batasan sebagai berikut:

1. Bahan kimia yang akan dicampurkan yaitu gliserin, asam sulfat dan asam nitrat.
2. Jumlah gliserin yang digunakan 5 ml.
3. Volume larutan yang diinjeksikan 0.25 ml.
4. Perbandingan asam nitrat dan asam sulfat 1:1.
5. Temperatur lingkungan dianggap konstan.
6. Reaksi kimia yang terjadi dibatasi pada hidrodinamika *interfacial instability* dalam *hele shaw cell*.

7. Pewarna dianggap tidak mempengaruhi reaksi kimia yang terjadi.
8. Membahas pola *viscous finger* yang terbentuk.
9. Lebar celah *hele show cell* yang digunakan adalah 0.15 mm.
10. Laju volume bahan kimia yang diinjeksikan dijaga konstan sebesar 0.025 ml/s.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh cara pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat sebagai katalis yang dicampurkan pada *hele shaw cell* terhadap ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*).

1.5 Manfaat Penelitian

1. Memberikan informasi tentang cara pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat untuk meningkatkan ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*).
2. Sumbangan pemikiran bagi dunia pendidikan khususnya bidang teknik dan bidang kesehatan.
3. Memberikan informasi tentang cara-cara peningkatan efektivitas dalam pembuatan nitrogliserin kepada dunia industri khususnya.
4. Bagi masyarakat umum dapat menambah wacana serta pengetahuan yang dapat memberikan dorongan terhadap perkembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Nagatsu & Ueda (2001) melakukan penelitian mengenai pengaruh dari variasi konsentrasi reaktan terhadap karakteristik dari reaksi kimia yang dapat bercampur pada fenomena *viscous fingering*. Hasil yang diperoleh bervariasi sejalan dengan variasi konsentrasi reaktan awal dan tergantung pada letak dari zona reaksi. Ketika zona reaksi terletak pada cairan yang memiliki kekentalan lebih tinggi, produk reaksi terkonsentrasi pada ujung *finger*, akan tetapi saat zona reaksi terletak pada cairan dengan kekentalan yang lebih rendah produk reaksi tersebar pada seluruh area pada bagian dalam *finger*. Perbedaan signifikan pada pola reaksi yang dihasilkan dari variasi konsentrasi reaktan disebabkan oleh perbedaan yang besar dari difusivitas molekular pada dua cairan, sehingga viskositas merupakan salah satu faktor penting dalam proses *viscous finger*.

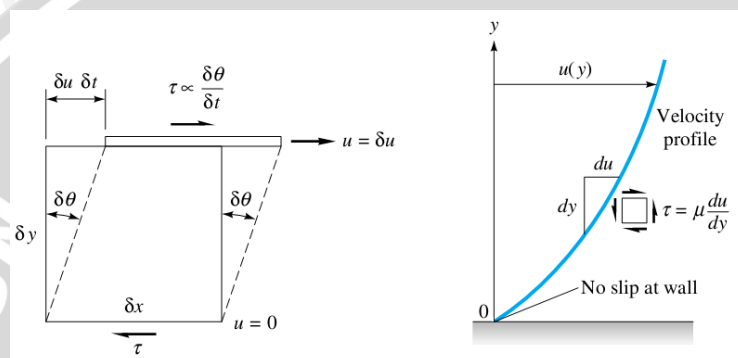
Egah (2009) melakukan penelitian tentang pengaruh konsentrasi asam nitrat (HNO_3) terhadap *interfacial instability* pada pembuatan nitrogliserin dengan asam sulfat (H_2SO_4) sebagai katalis. Pada penelitiannya, dia membuat sebuah model aliran dalam *hele shaw cell* yaitu sebuah alat yang terdiri dari dua plat yang terpisah dengan jarak yang kecil dan didalamnya terdapat gliserin yang akan diinjeksi dengan asam sulfat dan asam nitrat. Dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh perbandingan konsentrasi HNO_3 dan H_2SO_4 terhadap ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*). Hasil pada penelitiannya menunjukkan bahwa dengan variasi konsentrasi asam nitrat dan asam sulfat diperoleh perubahan ukuran *finger* atau *interfacial instability*, perubahan proses pembentukan *viscous finger*, perubahan lama terjadinya reaksi dan perubahan letak awal reaksi.

Santoso (2011) melakukan penelitian mengenai efek dari jumlah *atwood number* dalam reaksi nitrasi gliserol yang dilakukan pada kondisi hidrodinamika stabil dan tak stabil dengan mengubah posisi reaktan. Hasilnya menunjukkan bahwa bentuk *propagation reaction front* akan membentuk garis dan *position reaction front* akan lambat diawal dan akan semakin cepat diakhir reaksi. Perilaku reaksi nitrasi gliserol pada kondisi hidrodinamika stabil dan tak stabil sangat dipengaruhi oleh densitas relatif produk reaktan dan pembentukan ion-ion seperti juga pembentukan *reactive intermediate*.

2.2 Fluida

Fluida dapat didefinisikan sebagai suatu zat mampu mengalir dan dapat menyesuaikan bentuk dengan bentuk wadah yang ditempatinya, serta apabila diberikan tegangan geser, betapapun kecilnya akan menyebabkan fluida tersebut bergerak dan berubah bentuk secara terus-menerus selama tegangan tersebut bekerja (White, 1994 : 4).

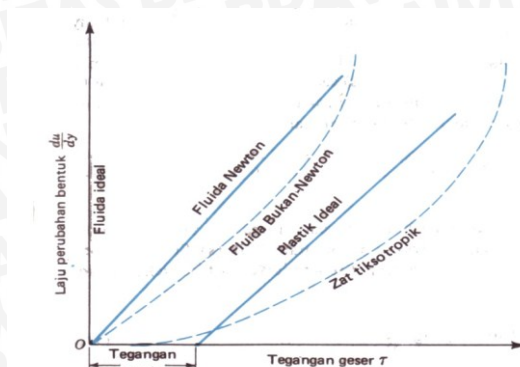
Definisi yang lebih tepat untuk membedakan zat padat dengan fluida ialah dari karakteristik deformasi bahan tersebut. Zat padat dianggap sebagai bahan yang menunjukkan reaksi deformasi yang terbatas ketika menerima suatu gaya geser.



Gamabar 2.1 Deformasi yang disebabkan oleh gaya geser
Sumber : White (1994 : 23)

Berdasarkan kemampuan fluida dalam menahan tegangan geser, fluida dibedakan menjadi fluida Newtonian dan fluida non-Newtonian (Streeter & Wylie, 1986 : 3). Dalam fluida Newtonian terdapat hubungan linier antara besarnya tegangan geser yang diterapkan dengan laju perubahan bentuk yang diakibatkan. Sedangkan fluida non-Newtonian memiliki hubungan yang tak linier antara besarnya tegangan geser dengan laju perubahan bentuk seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.2.

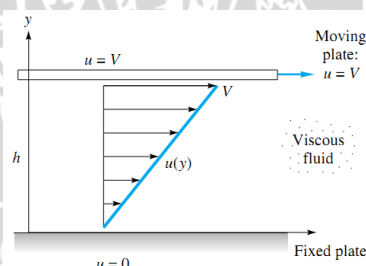
Fluida Newtonian adalah suatu jenis fluida yang memiliki kurva *shear stress* dan gradien kecepatan yang linier, yang digolongkan ke dalam fluida ini antara lain : air, udara, ethanol, benzena dan sebagainya. Fluida non-Newtonian adalah fluida yang tidak tahan terhadap tegangan geser (*shear stress*), gradient kecepatan (*shear rate*) dan temperatur. Dengan kata lain kekentalan (*viscosity*) merupakan fungsi dari waktu. Fluida non-Newtonian ini tidak mengikuti hukum Newton tentang aliran. Sebagai contoh dari fluida non-Newtonian ini antara lain : cat, minyak pelumas, lumpur, darah, obat-obatan cair, bubur kertas dan sebagainya.



Gambar 2.2 Fluida Newtonian dan fluida non-Newtonian
Sumber : Streeter & Wylie (1996 : 5)

2.3 Viskositas

Viskositas adalah sifat fluida dalam menahan laju deformasi dari molekul fluida tersebut. Hukum viskositas *Newton* menyatakan bahwa, untuk laju perubahan bentuk suatu fluida tertentu, merupakan fungsi dari tegangan geser dan viskositas. Contoh cairan yang sangat kental adalah larutan gula sedangkan air dan udara mempunyai viskositas yang sangat kecil atau tidak kental.

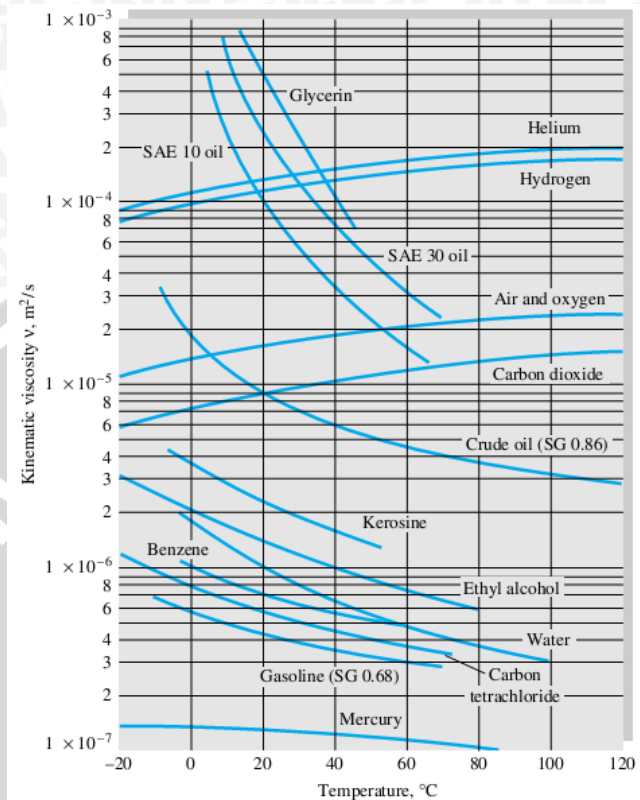


Gambar 2.3 Aliran viscous
Sumber : White (1994 : 26)

Pada gambar 2.4 terlihat viskositas dari berbagai fluida. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk fluida cair viskositas dinamik (μ) akan menurun dengan meningkatnya temperatur sedangkan untuk fluida gas sebaliknya, yaitu dengan meningkatnya temperatur maka viskositasnya juga meningkat. Menurut Streeter & Wylie (1996 : 8) perbedaan dalam kecenderungan terhadap suhu dikarenakan tahanan suatu fluida terhadap tegangan geser tersebut tergantung pada kohesinya dan laju perpindahan momentum molekulernya.

Kohesi merupakan salah satu penyebab utama viskositas cairan karena kohesi berkurang dengan naiknya temperatur, maka demikian pula dengan viskositasnya. Sebaliknya gas mempunyai gaya-gaya kohesi yang sangat kecil. Sebagian besar dari tahanannya terhadap tegangan geser merupakan akibat perpindahan momentum

molekuler. Viskositas akan bertambah jika pertukaran kalor yang acak antar molekul-molekulnya, sehingga meningkatnya temperatur mengakibatkan viskositasnya juga akan meningkat (Nekrasov, 1960 : 21)



Gambar 2.4 Viskositas kinematik berbagai fluida pada 1 atm
Sumber : White (1994 : 770)

Viskositas dibedakan menjadi 2 macam yaitu viskositas dinamik (μ) dan viskositas kinematik (ν), dimana viskositas kinematik secara matematis dinyatakan sebagai :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-1)$$

Dimana :

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

μ = viskositas dinamik ($\text{N.s}/\text{m}^2$)

ρ = densitas / massa jenis (kg/m^3)

1. Viskositas dinamik (μ)

Viskositas dinamik adalah perbandingan tegangan geser dengan laju perubahan kecepatan fluida, besarnya nilai viskositas dinamik tergantung dari faktor-faktor diatas tersebut, untuk viskositas dinamik air pada temperatur standar lingkungan (27°C) adalah $8.6 \times 10^{-4} \text{ kg/m.s}$

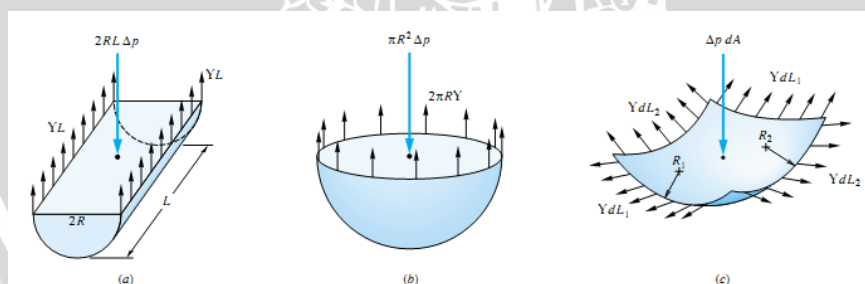
2. Viskositas kinematik (ν)

Viskositas kinematik merupakan perbandingan viskositas dinamik terhadap kerapatan (*density*) massa jenis dari fluida tersebut. Viskositas kinematik ini terdapat dalam beberapa penerapan antara lain dalam bilangan Reynolds yang merupakan bilangan tak berdimensi nilai viskositas kinematik air pada temperatur standar (27°C) adalah $8.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Pada fluida non-Newtonian viskositasnya ditentukan berupa *apparent viscosity* (kekentalan sesaat) karena umumnya fluida non-Newtonian memiliki suatu sifat histeresis hal ini menyebabkan untuk mencari viskositas aslinya sangatlah sulit.

2.4 Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan merupakan fenomena menarik yang terjadi pada zat cair (fluida) yang berada dalam keadaan diam (statis). Contoh yang menarik tetes air cenderung berbentuk seperti balon (yang merupakan gambaran luas minimum sebuah volum) dengan zat cair berada di tengahnya. Hal yang sama terjadi pada jarum baja yang memiliki rapat massa lebih besar dari air tapi dapat mengambang di permukaan zat cair. Fenomena ini terjadi karena selaput zat cair dalam kondisi tegang, tegangan fluida ini bekerja paralel terhadap permukaan dan timbul dari adanya gaya tarik menarik antara molekulnya.



Gamabar 2.5 Perubahan tekanan di antarmuka melengkung karena tegangan permukaan: (a) dalam silinder (b) cairan di dalam tetesan bola (c) antarmuka melengkung umum.

Sumber : White (1994 : 30)

Tegangan permukaan γ didefinisikan sebagai gaya F persatuan panjang L yang bekerja tegak lurus pada setiap garis di permukaan fluida.

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad (2-2)$$

Permukaan fluida yang berada dalam keadaan tegang meliputi permukaan luar dan dalam (selaput cairan sangat tipis tapi masih jauh lebih besar dari ukuran satu

molekul pembentuknya), sehingga untuk cincin dengan keliling L yang diangkat perlahan dari permukaan fluida, besarnya gaya F yang dibutuhkan untuk mengimbangi gaya-gaya permukaan fluida $2\gamma L$ dapat ditentukan dari pertambahan panjang pegas halus penggantung cincin (dinamometer). Sehingga tegangan permukaan fluida memiliki nilai sebesar,

$$\gamma = \frac{F}{2L} \quad (2-3)$$

Dimana,

γ = tegangan permukaan (N/m)

F = gaya (N)

L = panjang permukaan selaput fluida (m)

Karena tegangan permukaan merupakan perbandingan antara gaya tegangan permukaan dengan satuan panjang, maka satuan tegangan permukaan adalah Newton per meter atau dyne per centimeter ($1 \text{ dyn/cm} = 10^{-3} \text{ N/m} = 1 \text{ mN/m}$).

Ketika terjadi kenaikan suhu nilai tegangan permukaan mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena ketika suhu meningkat, molekul cairan bergerak semakin cepat sehingga pengaruh interaksi antar molekul cairan berkurang. Akibatnya nilai tegangan permukaan juga mengalami penurunan.



Gambar 2.6 Gaya adhesi (a) dan kohesi (b)

Sumber : Herdianto (2010)

Tegangan permukaan erat kaitannya dengan gaya kohesi dan adhesi seperti gambar 2.6 di atas, karena gaya kohesi dan adhesi yang menyebabkan terjadi tegangan permukaan. Kohesi atau gaya kohesi adalah sifat fisik dari suatu zat, yang disebabkan oleh gaya tarik antar molekul sejenis, sedangkan adhesi adalah gaya tarik antara molekul-molekul yang berbeda jenis.

2.5 Difusi

Difusi adalah peristiwa mengalirnya/berpindahannya suatu zat dalam pelarut dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah seperti pada gambar 2.7 dibawah. Perbedaan konsentrasi yang ada pada dua larutan disebut gradien konsentrasi. Difusi akan terus terjadi hingga seluruh partikel tersebar luas secara merata atau mencapai keadaan kesetimbangan dimana perpindahan molekul tetap terjadi walaupun tidak ada perbedaan konsentrasi. Contoh yang sederhana adalah pemberian gula pada cairan teh tawar. Lambat laun cairan menjadi manis. Contoh lain adalah uap air dari cerek yang berdifusi dalam udara. Difusi yang paling sering terjadi adalah difusi molekuler. Difusi ini terjadi jika terbentuk perpindahan dari sebuah lapisan (*layer*) molekul yang diam dari solid atau fluida.



Gambar 2.7 Pergerakan larutan dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah
Sumber : Anonymous^a (2010)

Ada beberapa faktor yang memengaruhi kecepatan difusi, yaitu:

- Ukuran partikel. Semakin kecil ukuran partikel, semakin cepat partikel itu akan bergerak, sehingga kecepatan difusi semakin tinggi.
- Ketebalan membran. Semakin tebal membran, semakin lambat kecepatan difusi.
- Luas suatu area. Semakin besar luas area, semakin cepat kecepatan difusinya.
- Jarak. Semakin besar jarak antara dua konsentrasi, semakin lambat kecepatan difusinya.
- Suhu. Semakin tinggi suhu, partikel mendapatkan energi untuk bergerak dengan lebih cepat. Maka, semakin cepat pula kecepatan difusinya.

2.6 Gliserin

Gliserol ialah suatu trihidroksi alkohol $C_3H_5(OH)_3$ yang terdiri atas 3 atom karbon. Jadi tiap atom karbon mempunyai gugus $-OH$. Satu molekul gliserol dapat

mengikat satu, dua, tiga molekul asam lemak dalam bentuk ester, yang disebut monogliserida, digliserida dan trigliserida.

Pemakaian kata gliserol dan gliserin sering membuat orang bingung. Gliserol dan gliserin adalah sama, tetapi pemakaian kata gliserol biasa dipakai jika kemurnian rendah (masih terkandung dalam air manis) sedangkan pemakaian kata gliserin dipakai untuk kemurnian yang tinggi. Tetapi secara umum, gliserin merupakan nama dagang dari gliserol.

Gliserol dapat diperoleh dengan jalan penguapan, kemudian dimurnikan dengan distilasi pada tekanan rendah. Pada umumnya lemak apabila dibiarkan lama di udara akan menimbulkan rasa dan bau yang tidak enak. Hal ini disebabkan oleh proses hidrolisis yang menghasilkan asam lemak bebas. Di samping itu dapat pula terjadi proses oksidasi terhadap asam lemak tidak jenuh yang hasilnya akan menambah bau dan rasa yang tidak enak. Oksidasi asam lemak tidak jenuh akan menghasilkan peroksida dan selanjutnya akan terbentuk aldehida. Inilah yang menyebabkan terjadinya bau dan rasa yang tidak enak atau tengik. Gliserol yang diperoleh dari hasil penyabunan lemak atau minyak adalah suatu zat cair yang tidak berwarna dan mempunyai rasa yang agak manis. Gliserol larut baik dalam air dan tidak larut dalam eter. Gliserol digunakan dalam industri farmasi dan kosmetika sebagai bahan dalam preparat yang dihasilkan. Di samping itu gliserol berguna bagi kita untuk sintesis lemak di dalam tubuh.

Pada saat ini pemakaian gliserin untuk keperluan industri sudah sangat luas sekali. Berikut ini persentase pemakaian gliserin untuk berbagai keperluan industri :

- | | | | |
|----------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| • <i>Alkyd resin</i> | : 36% | • <i>Food/beverages</i> | : 10% |
| • <i>Cosmetic/pharmaceutical</i> | : 30% | • <i>Urethane uses</i> | : 6% |
| • <i>Tobacco product</i> | : 16% | • <i>Explosives</i> | : 2% |

2.7 Asam Nitrat

Asam nitrat adalah larutan asam kuat yang mempunyai nilai pKa sebesar -2. Di dalam air, asam ini terdisosiasi menjadi ion-ionnya, yaitu ion nitrat NO_3^- dan ion hidronium (H_3O^+). Garam dari asam nitrat disebut sebagai garam nitrat (contohnya seperti kalsium nitrat atau barium nitrat). Dalam temperatur ruangan, asam nitrat berbentuk uap berwarna merah atau kuning.

Senyawa kimia asam nitrat (HNO_3) adalah sejenis cairan korosif yang tak berwarna dan merupakan asam beracun yang dapat menyebabkan luka bakar. Larutan asam nitrat dengan kandungan asam nitrat lebih dari 86% disebut sebagai asam nitrat

berasap dan dapat dibagi menjadi dua jenis asam, yaitu asam nitrat berasap putih dan asam nitrat berasap merah.

Asam nitrat murni (100%) merupakan cairan tak berwarna dengan berat jenis 1.522 kg/m³. Ia membeku pada suhu -42°C, membentuk kristal-kristal putih dan mendidih pada 83°C serta memiliki nilai keasaman (pKa) 1,4.

Sebagai mana asam pada umumnya, asam nitrat bereaksi dengan alkali, oksida basa dan karbonat untuk membentuk garam, seperti amonium nitrat. Karena memiliki sifat mengoksidasi, asam nitrat pada umumnya tidak menyumbangkan protonnya (yakni, membebaskan hidrogen) pada reaksi dengan logam dan garam yang dihasilkan biasanya berada dalam keadaan teroksidasi yang lebih tinggi. Karenanya, perkaratan (korosi) tingkat berat bisa terjadi. Perkaratan bisa dicegah dengan penggunaan logam ataupun aloi anti karat yang tepat.

2.8 Asam Sulfat

Asam sulfat (H₂SO₄) merupakan asam mineral (anorganik) yang kuat. Zat ini larut dalam air pada semua perbandingan. Asam sulfat mempunyai banyak kegunaan dan merupakan salah satu produk utama industri kimia. Kegunaan utamanya untuk pemrosesan bijih mineral, sintesis kimia, pemrosesan air limbah dan pengilangan minyak.

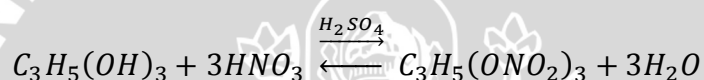
Asam sulfat murni yang tidak diencerkan tidak dapat ditemukan secara alami di bumi oleh karena sifatnya yang higroskopis. Walaupun demikian, asam sulfat merupakan komponen utama hujan asam yang terjadi karena oksidasi sulfur dioksida di atmosfer dengan keberadaan air (oksidasi asam sulfat). Sulfur dioksida adalah produk sampingan utama dari pembakaran bahan bakar seperti batu bara dan minyak yang mengandung sulfur (belerang). Walaupun asam sulfat yang mendekati 100% dapat dibuat, ia akan melepaskan SO₃ pada titik didihnya dan menghasilkan asam 98,3%. Asam sulfat 98% lebih stabil untuk disimpan dan merupakan bentuk asam sulfat yang paling umum. Asam sulfat 98% umumnya disebut sebagai asam sulfat pekat. Terdapat berbagai jenis konsentrasi asam sulfat yang digunakan untuk berbagai keperluan:

- 10%, asam sulfat encer untuk kegunaan laboratorium,
- 33,53%, asam baterai,
- 62,18%, asam bilik atau asam pupuk,
- 73,61%, asam menara atau asam glover,
- 97%, asam pekat.

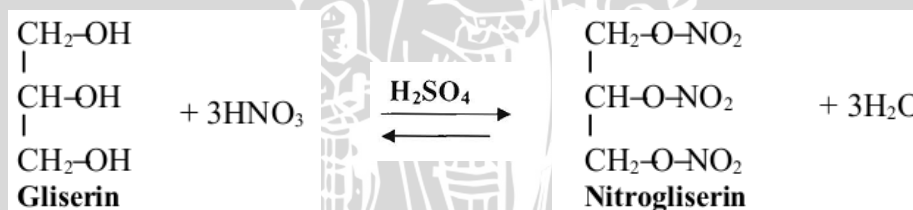
Terdapat juga asam sulfat dalam berbagai kemurnian. Mutu teknis H_2SO_4 tidaklah murni dan seringkali berwarna, namun cocok untuk digunakan untuk membuat pupuk. Mutu murni asam sulfat digunakan untuk membuat obat-obatan dan zat warna. Asam sulfat murni berupa cairan bening seperti minyak dan oleh karenanya pada zaman dahulu ia dinamakan minyak vitriol.

2.9 Pembuatan Nitrogliserin

Tahun 1846 ahli kimia yang berasal dari Italy *Ascanio Sobrero* berhasil membuat nitrogliserin dengan cara nitrasi langsung gliserin menggunakan asam nitrat pekat dalam media asam sulfat berdasarkan reaksi di bawah. Secara komersial diproduksi oleh Alfred Nobel pada tahun 1884. Dia membuat *flegmtisasi* nitrogliserin (mengisi interstisi dengan *inert plasticizer*) yang lebih sensitif terhadap gesekan mekanis yang secara luas digunakan untuk dinamit dalam aplikasi pertambangan.



Nitrogliserin dapat dibuat dengan mereaksikan gliserin (gliserol) dengan asam nitrat (HNO_3). Reaksi ini merupakan reaksi esterifikasi, yaitu reaksi antara alkohol dan asam, seperti terlihat dalam reaksi dibawah ini.



Gambar 2.8 Reaksi nitrasi gliserin

Sumber : Zaidar (2003 : 5)

Dari persamaan reaksi tersebut dapat kita lihat bahwa ion H^+ dari gliserin akan disubstitusi dengan ion NO_2^+ yang dihasilkan dari reaksi asam nitrat dengan asam sulfat sehingga terbentuk nitrogliserin seperti yang terlihat pada reaksi keseluruhan pembuatan nitrogliserin diatas.

Pada saat ini, asam yang umum digunakan sebagai *nitrating agent* adalah campuran asam nitrat dan asam sulfat dengan perbandingan sebagai berikut:

40-50% HNO_3

50-60% H_2SO_4

Perbandingan asam atau gliserin harus dijaga sedemikian rupa sehingga jumlah asam berlebih (kira-kira 20%) dari asam yang seharusnya dibutuhkan menurut perhitungan teoritis. Asam yang tersisa setelah reaksi tidak boleh digunakan lagi sebagai *nitrating agent* atau disimpan. Hal ini karena besar kemungkinan nitrogliserin masih terdapat dalam asam tersebut dan dapat menyebabkan bahaya ledakan.

Cara pengadukan adalah satu faktor utama yang harus diperhatikan, selain tentu saja pengadukan yang kurang baik akan menghasilkan hasil yang rendah. Yang harus diperhatikan dalam pengadukan adalah semua bagian harus teraduk, tidak boleh ada bagian dalam reaktor yang tidak teraduk yang menyebabkan terakumulasikannya panas yang tidak terkontrol dan bisa menimbulkan resiko ledakan.

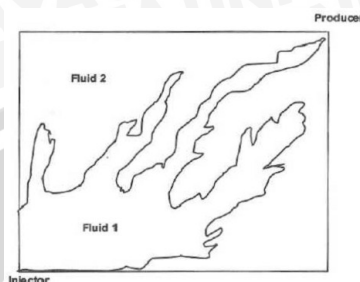
Selain bahan peledak, nitrogliserin juga digunakan sebagai obat untuk meredakan rasa sakit dan mengurangi frekuensi serangan agiria pektoris. Tablet nitrogliserin biasa larut di bawah lidah dalam 20 detik dan meredakan sakit dalam 3 menit (Zaidar, 2003 : 6).

2.10 Ketidakstabilan Antarmuka (*Interface Instability*)

Proses pencampuran dua zat atau lebih bertujuan untuk mendapatkan hasil campuran yang sempurna. Untuk mendapatkan campuran atau reaksi kimia yang sempurna maka diharapkan terciptanya aliran turbulen, tetapi hal ini sulit untuk mendapatkan aliran turbulen ketika fluidanya mempunyai viskositas yang tinggi. Dimana dalam kasus seperti ini kita dapat memanfaatkan fenomena *viscous finger*. Sistem *viscous fingering* ini efektif di gunakan untuk meningkatkan proses pencampuran dan reaksi kimia karena *fingering* menghasilkan luas permukaan kontak yang lebih besar antara dua fluida. Dalam pencampuran dua zat terdapat zat yang ditambahkan dalam zat lain, dalam penelitian ini asam nitrat dan asam sulfat ditambahkan dalam larutan gliserin. Dalam hal ini, apabila kita menambahkan asam nitrat maupun asam sulfat dalam larutan gliserin maka asam nitrat maupun asam sulfat tersebut akan memindahkan ruang dan akan menerobos dalam larutan gliserin. *Interface instability* merupakan bentuk pendesakan tidak stabil antarmuka akibat proses pendesakan fluida yang kurang kental oleh fluida lain yang lebih kental (Nagatsu & Ueda, 2001 : 1711). Dimana larutan yang memiliki viskositas yang lebih tinggi yaitu gliserol. Proses pendesakan jari ini disebut *viscous finger*.

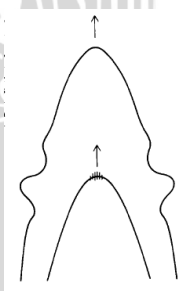
Faktor utama dalam penelitian ini adalah *fingering* yang disebabkan oleh *viscous force*. Penyebab lain *viscous force* ini adalah ketidakcocokan perbandingan viskositas,

gaya gravitasi yang disebabkan oleh gradien dari massa jenis fluida, gaya kapiler karena tegangan permukaan (*interfacial*) antara dua fluida yang tidak dapat bercampur. Satu atau beberapa dari efek gaya tersebut dapat menimbulkan *viscous fingering* mempunyai efek yang sangat besar dalam proses pencampuran dua zat atau lebih. Gambar 2.9 dibawah ini menunjukkan terbentuknya *viscous fingering* :



Gambar 2.9 *Viscous finger*
Sumber : Eli (2008 : 6)

Dari gambar 2.9 dapat dilihat bahwa semakin terbentuk *viscous finger* maka bidang kontak antara fluida 1 dengan fluida 2 akan semakin besar, itu artinya semakin *viscous finger* terbentuk maka campuran antara dua fluida tersebut semakin sempurna. *Viscous fingering* akan meningkat seiring dengan peningkatan perbandingan viskositas. Selain itu *viscous fingering* juga akan semakin membesar akibat gaya dispersi yang disebabkan gradien konsentrasi antara dua fluida yang bisa bercampur. Dimana semakin besar perbedaan viskositas dan gaya dispersi maka *interfacial instability* antara dua fluida tersebut akan semakin terganggu dan akan menimbulkan percabangan. Gambar 2.10 berikut ini menunjukkan proses terbentuknya percabangan.



Gambar 2.10 Proses terbentuknya percabangan
Sumber : Eli (2008 : 6)

Viskositas pada fluida akan mempengaruhi kecepatan perambatan bidang kontak antara fluida satu dengan fluida yang lain, dimana kecepatan perambatan bidang kontak tersebut akan mempengaruhi nilai dari *capillary number*. *Capillary number* didefinisikan sebagai kemampuan sebuah fluida untuk menembus fluida lain. *Capillary number* dirumuskan dengan :

$$Ca = \frac{\mu V}{\sigma} \quad (2-4)$$

Dimana :

μ = viskositas larutan (Pa.s)

V = kecepatan perambatan (m/s)

σ = tegangan permukaan (N/m)

Dari rumusan diatas ditunjukkan bahwa viskositas akan berbanding lurus dengan *capillary number*, sehingga semakin tinggi viskositas larutan maka diikuti dengan semakin menurunnya lebar jari (*finger*).

Panjang gelombang kritis (*instability wave-length*) yang dihasilkan oleh *viscous finger* dilambangkan dengan simbol λ , jari (*finger*) yang dihasilkan oleh *viscous finger* secara matematis ditunjukkan oleh rumus berikut :

$$\lambda_c = \pi \cdot b \sqrt{\frac{\sigma}{\mu V}} \quad (2-5)$$

Dimana :

λ_c = panjang gelombang kritis/ *instability wave-length* (m)

π = 3,14

b = Lebar celah antar plat/*hele shaw cell* (m)

σ = Surface tension (N/m)

μ = viskositas (Pa.s)

V = kecepatan antarmuka (m/s)

Semakin besar viskositas dinamik fluida dalam *hele shaw cell* (μ) maka akan diikuti dengan semakin kecilnya lebar jari *viscous finger*. Lebar *finger* dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$W_0 = \frac{1}{2} \lambda_c \quad (2-6)$$

Dimana,

W_0 = lebar *finger* (m)

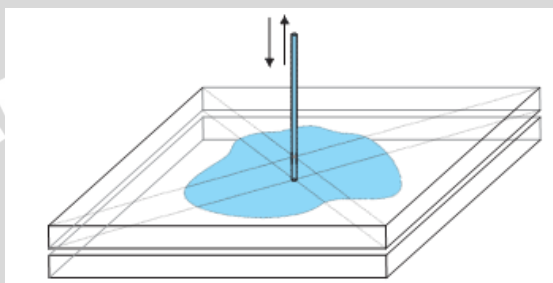
λ_c = panjang gelombang kritis (m)

Selain untuk mengetahui bagaimana pengaruh pola pencampuran larutan pada *hele shaw cell* terhadap bentuk *interfacial instability*, melalui penelitian ini juga dapat

diketahui hubungan antara hidrodinamika dengan kimia yaitu bagaimana hubungan keliling bidang kontak *viscous finger* terhadap lebar rata-rata *finger*.

2.11 *Hele Shaw Cell*

Hele shaw cell ditemukan oleh Henry Selby Hele-Shaw dan aliran didalamnya didefinisikan sebagai aliran Stokes antara dua pelat paralel datar dipisahkan oleh celah yang sangat kecil. Media ini dapat digunakan untuk mempelajari berbagai macam fenomena pendesakan dua fluida yang memiliki beda viskositas.

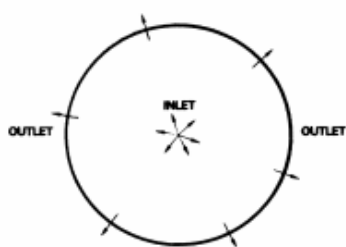


Gamabar 2.11 *Hele shaw cell* horisontal dengan injeksi
Sumber : Vondenhoff (2009 : 2)

Secara umum *Hele-Shaw cell* dapat dibagi menjadi dua tipe, yaitu :

1. Tipe Lateral
2. Tipe Radial

Tipe Lateral memiliki ciri *finger* yang dihasilkan menuju hanya satu arah dan bentuknya persegi panjang, sedangkan tipe radial memiliki ciri *finger* yang dihasilkan menuju ke segala arah seperti ditunjukkan pada gambar 2.12.



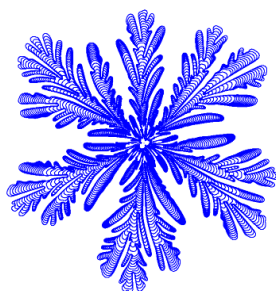
(a)



(b)

Gambar 2.12 Gambar dari tipe *hele-shaw cell* (a) Tipe Radial; (b) Tipe Lateral
Sumber : Daccord & Stanley (1986 : 337)

Gambar 2.12 dan 2.13 berikut ini merupakan contoh gambar *viscous finger*, baik tipe lateral dan radial:



Gambar 2.13 Bentuk umum radial *viscous finger*
Sumber : Li (PRL 102, 174501 2009).



Gambar 2. 14 Lateral *viscous finger* dalam *hele-shaw cell*
Sumber : Brehm (2011)

2.12 Hipotesa

Cara pencampuran antara gliserin, asam nitrat dan asam sulfat yang terbaik yaitu gliserin dan asam nitrat diinjeksikan dengan asam sulfat. Pada pola pencampuran ini terbentuk dua buah proses nitrasi yang disebabkan oleh ion nitronium selanjutnya terjadi proses *reactive intermediate* sehingga akan memacu reaksi lebih cepat. Selain itu, *viscous finger* yang terbentuk semakin panjang dan menghasilkan bidang kontak yang semakin luas antara campuran gliserin dan asam nitrat dengan asam sulfat sehingga menghasilkan *interfacial instability* yang besar.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental nyata (*true experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk memperoleh data sebab akibat melalui eksperimen guna mendapatkan data empiris. Dalam penelitian ini akan diamati pengaruh pencampuran gliserin dan asam nitrat, dengan asam sulfat sebagai katalis yang dicampurkan pada *hele shaw cell*.

3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan Februari 2012 - selesai.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Variabel bebas (*independent variabel*) adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel yang lain. Variabel bebas diubah-ubah untuk mendapatkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah cara pencampuran yang digunakan yaitu :
 - Gliserin, diinjeksikan dengan asam sulfat dan asam nitrat
 - Gliserin dan asam nitrat, diinjeksikan dengan asam sulfat
 - Gliserin dan asam sulfat, diinjeksikan dengan asam nitrat
2. Variabel terikat (*dependent variabel*) adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah bentuk *finger*, panjang jari-jari *viscous finger*, keliling bidang kontak dan luas daerah reaksi yang terbentuk dalam *hele shaw cell*.
3. Variabel terkontrol (*controlled variabel*) adalah variabel yang berfungsi sebagai pembanding yang besarnya ditentukan oleh peneliti. Dalam penelitian ini variabel terkontrol yang digunakan adalah waktu pengamatan bentuk *finger*, panjang jari-jari *viscous finger*, keliling bidang kontak dan luas daerah reaksi. Adapun waktu pengamatan untuk perkembangan *viscous finger*

dilakukan setiap 2 s, 4 s, 6 s, 8 s dan 10 s. Serta untuk perkembangan daerah reaksi dimulai dari penginjeksian sampai terjadinya reaksi nitration.

3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian

3.3.1 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan adalah:

- Gliserin dengan kemurnian 98-99%.
- Asam sulfat dengan kemurnian 98-99%.
- Asam nitrat dengan kemurnian 98-99%.
- Pewarna

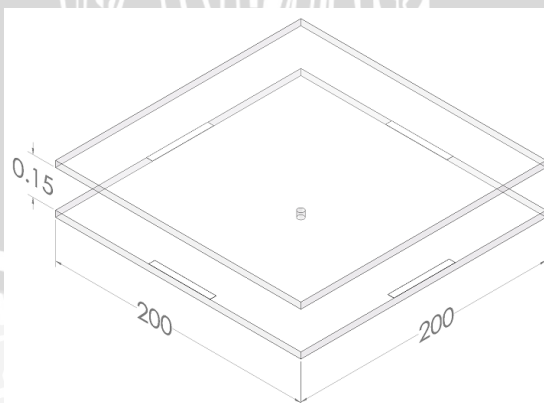
Digunakan pewarna (tartrazin CI 191140) untuk memberi warna campuran asam nitrat, asam sulfat atau campuran keduanya agar dapat diamati proses terbentuknya *viscous finger*. Serbuk pewarna diberikan sebanyak 0.2 gr setiap 0.25 ml larutan yang akan diinjeksikan.

3.3.2 Peralatan Penelitian

Fungsi dan spesifikasi peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Hele Shaw Cell

Media untuk mengamati terbentuknya *viscous finger*, terbuat dari dua plat kaca ukuran 200 x 200 mm, dengan tebal masing-masing 5 mm. Dua plat tersebut terpisah dengan jarak yang telah diatur sebelumnya sesuai dengan kebutuhan penelitian dan didalam celah tersebut terjadi pencampuran antara gliserin, asam nitrat dan asam sulfat.



Gambar 3.1 Hele shaw cell

2. Injector

Spesifikasi : volume 3 ml

Digunakan untuk menginjeksikan asam nitrat, asam sulfat dan campuran keduanya ke *hele shaw cell*.



Gambar 3.2 Syringe pump
Sumber : Mraz (2012)

3. Kamera

Digunakan untuk merekam proses terjadinya *viscous finger* selama proses penginjeksian berlangsung dan reaksi yang terjadi pada campuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat.



Gambar 3.3 Kamera digital

Spesifikasi :

- Merk : Casio
- Model : Exilim EX-ZS10
- Buatan : Casio America, Inc
- Optical zoom : 5X

4. Gelas Ukur

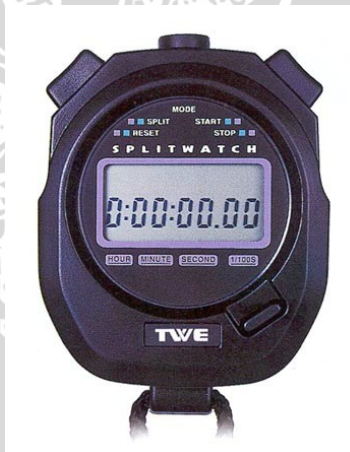
Digunakan untuk menakar volume asam sulfat, asam nitrat dan gliserin, sesuai dengan yang dibutuhkan. Volume gelas ukur yang akan digunakan sebesar 5 ml.



Gambar 3.4 Gelas ukur
Sumber : Irfana (2011)

5. Stopwatch

Digunakan untuk mengukur waktu penginjeksian sehingga dapat diketahui debit asam sulfat, asam nitrat dan campuran keduanya.



Gambar 3.5 Stopwatch
Sumber : Anonymous^b (2011)

6. Saluran Injektor

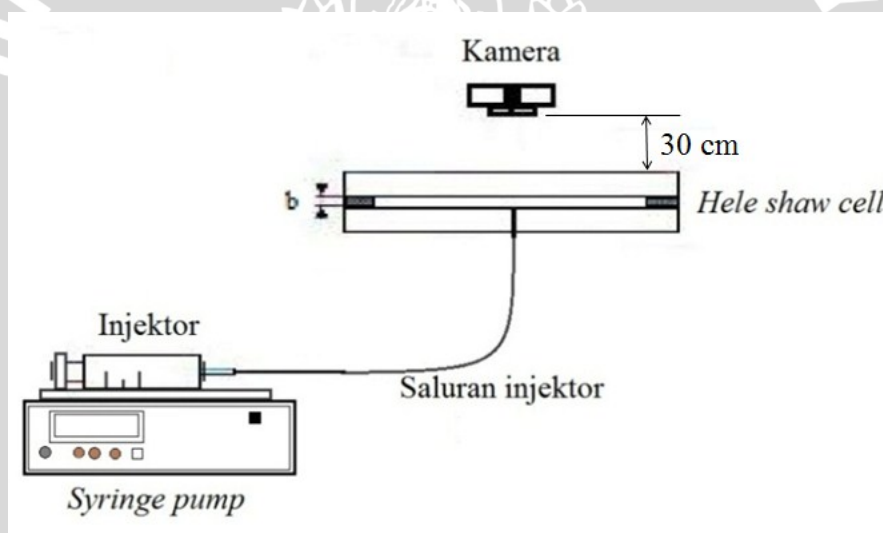
Digunakan untuk mengalirkan asam nitrat, asam sulfat dan campuran keduanya menuju ke dalam celah *hele shaw cell*. Saluran injektor yang digunakan terbuat dari plastik dan memiliki diameter dalam 1,5 mm.



Gambar 3.6 Saluran injektor
Sumber : Mandiri (2012)

3.5 Instalasi Penelitian

Alat uji merupakan komponen penting yang digunakan untuk mengambil data penelitian. Komponen-komponen alat uji terdiri atas peralatan yang sebagaimana sudah disebutkan sebelumnya, sedangkan rangkaian alat uji penelitian dapat dilihat seperti pada gambar 3.7 berikut ini :



Gambar 3.7 Rangkaian alat uji penelitian

3.6 Prosedur Pengambilan Data

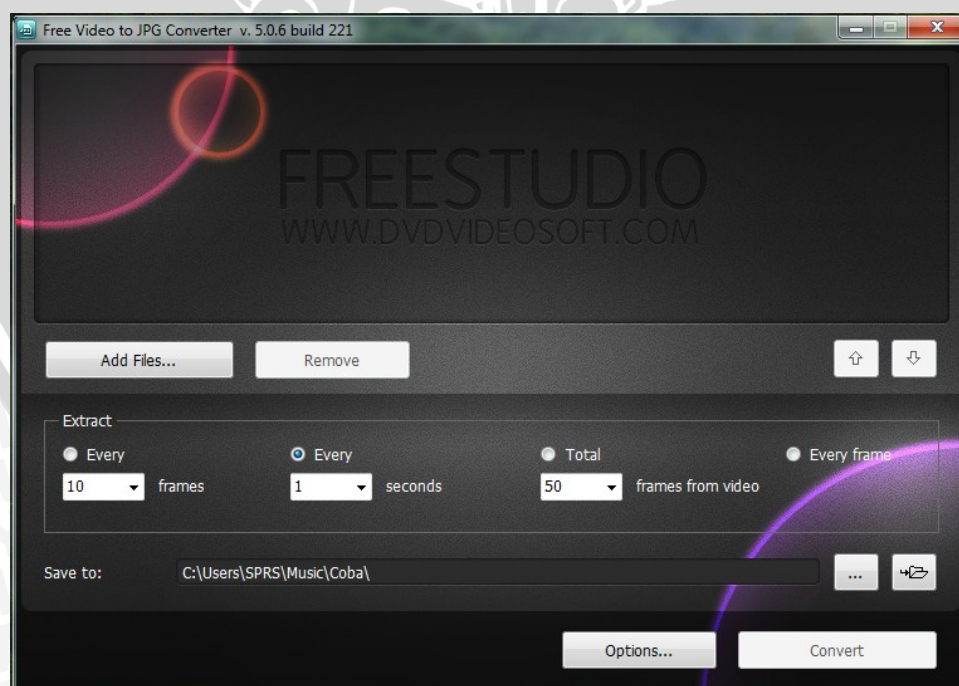
Supaya fenomena *viscous finger* dapat diamati maka sebelum melakukan penelitian perlu di berikan serbuk pewarna pada larutan yang akan diinjeksikan sebanyak 0.2 gr setiap 0.25 ml. Prosedur dari pengambilan data ini meliputi hal-hal sebagai berikut :

Gliserin, diinjeksikan dengan asam sulfat dan asam nitrat

1. Prosedur pengaturan debit injeksi

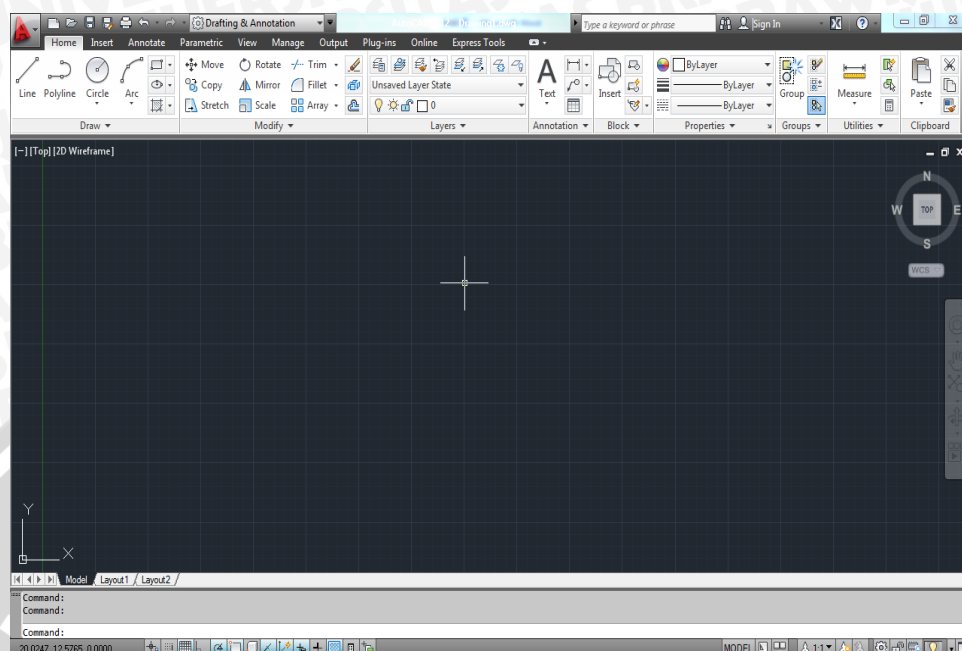
- a. Asam nitrat dan asam sulfat dimasukkan ke dalam injektor sebesar 0.25 ml dengan perbandingan 1:1.

- b. Pada injektor (*syringe pump*), putaran motor diatur sesuai dengan debit yang diinginkan. Laju injeksinya 0.025 ml/s.
2. Prosedur pembentukan *viscous finger* dan pengambilan data
 - a. *Setting* semua peralatan penelitian sesuai yang telah ditunjukkan pada gambar 3.7.
 - b. Campuran asam nitrat dan asam sulfat dimasukkan ke dalam injektor, letakkan injektor pada *syringe pump*.
 - c. Atur atau set putaran *syringe pump* sesuai dengan debit yang diinginkan.
 - d. Hidupkan *syringe pump* hingga campuran asam nitrat dan asam sulfat memenuhi saluran injektor, kemudian matikan.
 - e. Masukkan gliserin ke dalam *hele shaw cell*.
 - f. Pasang injektor pada *syringe pump* dan alat siap untuk diinjeksikan.
 - g. Hidupkan kamera dan *syringe pump* secara bersamaan. *Syringe pump* dinyalakan selama 10 detik dengan debit 0.025 ml/s. Ambil data melalui hasil video dengan melihat perkembangan *finger* yang terbentuk tiap waktunya sesuai dengan variabel bebasnya.
 - h. Data rekaman proses terbentuknya *viscous finger* dan daerah reaksi berupa *file* video kemudian dikonversi ke bentuk gambar menjadi beberapa *frame* menggunakan aplikasi “Free Studio Manager 5.3.5”



Gambar 3.8 Aplikasi *Free Studio Manager*

- i. Data berupa gambar bentuk *viscous finger* nantinya diukur panjang jari-jarinya menggunakan aplikasi “*AUTO CAD 2013*”



Gambar 3.9 Aplikasi *AUTO CAD*

- j. Prosedur ini diulang untuk tiap-tiap variasi pengujian dengan membersihkan semua peralatan dari sisa-sisa pengujian sebelumnya terlebih dahulu.

Prosedur pengambilan data untuk metode pencampuran (2) gliserin dan asam nitrat diinjeksikan dengan asam sulfat serta (3) Gliserin dan asam sulfat diinjeksikan dengan asam nitrat, dilakukan dengan cara yang sama seperti pada cara pencampuran (1).

3.7 Diagram Alir Penelitian

Proses penelitian yang dilakukan secara diagram dapat ditunjukkan seperti pada gambar 3.10 berikut ini :



Gambar 3.10 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Hasil penelitian terdiri dari 3 macam, yaitu:

1. Perubahan bentuk *interfacial instability* pada variasi cara pencampuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat pada *hele shaw cell*.
2. Perubahan jari-jari *viscous finger* dan keliling bidang kontak akibat variasi cara pencampuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat pada *hele shaw cell*.
3. Perubahan bentuk daerah reaksi, jar-jari reaksi dan lama terjadinya reaksi akibat variasi cara pencampuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat pada *hele shaw cell*.

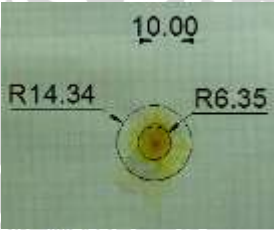
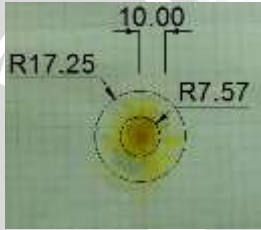
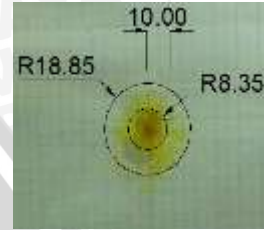
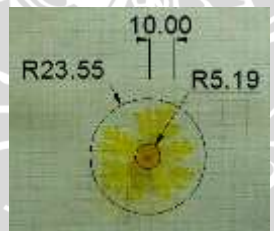
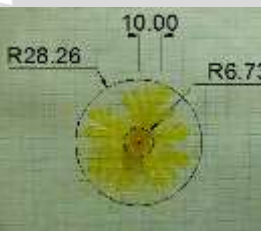
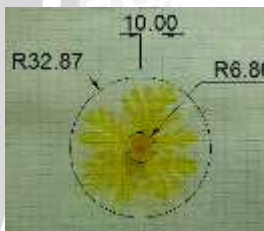
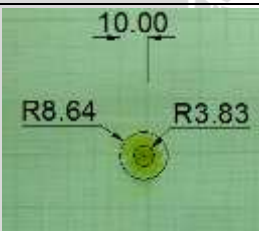
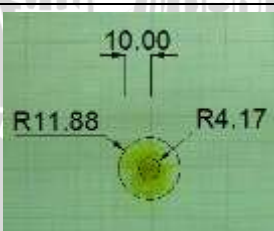
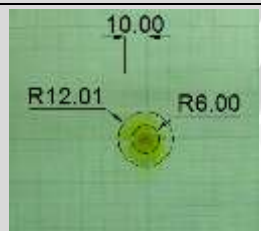
4.2 Pembahasan

Pembahasan ini ditujukan untuk mengetahui kecenderungan dari data hasil penelitian yang dilakukan pada setiap pengambilan data pada cara penginjeksian atau pencampuran asam sulfat, asam nitrat dan gliserin dalam *hele shaw cell*.

4.2.1 Visualisasi bentuk *interfacial instability* pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam *hele shaw cell*.

Untuk mengetahui bagaimana proses terbentuknya *interfacial instability* (ketidakstabilan antarmuka) pada berbagai cara pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat dalam *hele shaw cell* dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pada tabel dibawah ini menjelaskan proses pembentukan secara visual *interfacial instability* (*viscous finger*) dan jari-jari *viscous finger* pada saat awal sampai akhir penginjeksian, yaitu selama 10 detik dari $t = 0$ detik sampai $t = 10$ detik dengan kelipatan 2 detik.

Tabel 4.1 Visualisai pembentukan *interfacial instability (viscous finger)* dan jari-jari *viscous finger* pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam *hele shaw cell*.

Waktu (detik)		2	4	6	8	10
Gliserin + Asam Nitrat Diinjeksi Asam Sulfat						
Viscous Finger (mm)	R _D	4.33	5.61	6.35	7.57	8.35
	R _L	7.12	12.46	14.34	17.25	18.85
Gliserin + Asam Sulfat Diinjeksi Asam Nitrat						
Viscous Finger (mm)	R _D	3.98	4.92	5.19	6.73	6.86
	R _L	12.08	16.46	23.55	28.26	32.87
Gliserin Diinjeksi Asam Sulfat + Asam Nitrat						
Viscous Finger (mm)	R _D	2.28	3.83	4.17	6.00	6.66
	R _L	4.15	8.64	11.88	12.01	13.96

Dari Tabel 4.1 visualisasi *interfacial instability* pada ketiga cara pencampuran antara gliserin, asam nitrat dan asam sulfat dapat dilihat bahwa *viscous finger* yang dihasilkan memiliki bentuk yang berbeda-beda. Secara teoretis, volume larutan yang diinjeksikan sama dengan volume larutan yang terbentuk pada *hele shaw cell* bila tidak terjadi difusi. Namun, pada fenomena pencampuran larutan diatas tampak bahwa larutan yang diinjeksikan mempunyai jari-jari yang berbeda baik jari-jari dalam ataupun jari-jari luar (ditunjukkan dengan warna kuning). Hal tersebut dapat terjadi karena kemampuan untuk berdifusi antara cara pencampuran berbeda-beda. Berikut ini tabel densitas serta berat molar dari fluida yang digunakan :

Tabel 4.2 Properties fluida pada *hele shaw cell* saat 25°C 100kPa.

No	Fluid	Densitas (gr/cm ³)	Viskositas (Pa.s)	Berat Molar (gr/mol)
1.	Gliserin [C ₃ H ₅ (OH) ₃]	1.261	1.412	92.09
2.	Asam Sulfat [H ₂ SO ₄]	1.51	26.7 cP (20 °C)	62.98
3.	Asam Nitrat [HNO ₃]	1.84	-	98.08

Sumber : Santoso (2012 : 17)

Finger yang terbentuk dengan cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat memiliki panjang jari-jari luar yang relatif lebih panjang jika dibandingkan dengan cara pencampuran yang lain. Hal ini dikarenakan pada cara pencampuran ini ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*) lebih besar akibat dari viskositas gliserin + asam sulfat yang semakin menurun sehingga ketika jumlah asam nitrat yang diinjeksikan habis *finger* yang terbentuk cenderung panjang dan kompleks. Selain itu, proses difusi antar larutan penginjeksi dan yang terdesak sangatlah besar. Asam nitrat yang diinjeksikan fluida mudah menembus dan berdifusi dengan campuran gliserin dan asam sulfat sehingga *finger* yang terbentuk sangatlah panjang. *Finger* yang terbentuk bukanlah semata-mata murni asam nitrat, melainkan telah mendapatkan tambahan volume campuran gliserin dan asam sulfat akibat difusi yang terjadi baik di bagian atas, tengah ataupun bawah dalam celah *hele shaw cell*.

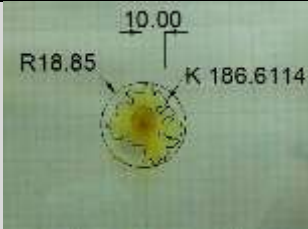
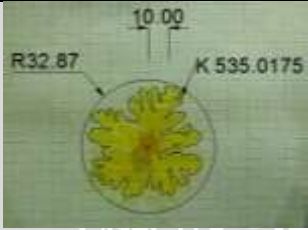
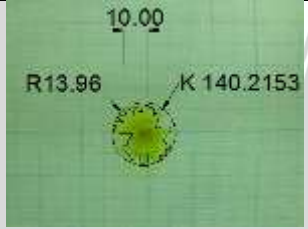
Pada pencampuran dengan cara gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat dan gliserin diinjeksi asam sulfat + asam nitrat, ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*) yang terjadi lebih kecil. Hal ini menyebabkan terbentuknya *viscous finger* yang mempunyai bentuk sederhana dengan ukuran yang lebih pendek. Selain itu apabila kita amati pada kedua cara pencampuran ini, larutan penginjeksi cenderung tidak

menyebar dalam *hele shaw cell* melainkan cenderung mengumpul. Fenomena ini terjadi akibat fluida yang diinjeksikan sulit untuk menerobos larutan yang akan didesak karena larutan dalam *hele shaw cell* lebih kental daripada larutan yang diinjeksikan. Meskipun demikian, proses difusi tetap terjadi tetapi lebih lambat jika dibandingkan dengan cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat.

4.2.2 Keliling bidang kontak campuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat dalam *hele shaw cell* pada akhir injeksi.

Untuk mengetahui seberapa besar bidang kontak antara fluida pendesak dan fluida yang didesak pada akhir penginjeksian saat waktu (t) 10 detik dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.3 Keliling bidang kontak campuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat pada akhir penginjeksian t = 10 detik

Cara Pencampuran	Visualisasi Bentuk	Jari-Jari Luar (mm)	Keliling Bidang Kontak (mm)
Gliserin + Asam Nitrat Diinjeksi Asam Sulfat		18.85	186.6114
Gliserin + Asam Sulfat Diinjeksi Asam Nitrat		32.87	535.0175
Gliserin Diinjeksi Asam Sulfat + Asam Nitrat		13.96	140.2153

Tabel 4.3 di atas yang menunjukkan bentuk *viscous finger* pada akhir penginjeksian (t=10 s) pada ketiga cara pencampuran. Dapat dilihat bahwa *viscous finger* yang dihasilkan memiliki bentuk yang berbeda-beda. Lebar *viscous finger* yang kecil/sempit dan paling kompleks bisa ditunjukkan pada cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat. Semakin kompleks *viscous finger* yang terbentuk maka keliling bidang kontak antar muka juga akan semakin panjang. Keliling bidang kontak

antarmuka ini sangat penting pada proses difusi. Karena pada proses difusi terjadi perpindahan suatu zat (fluida) dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah. Difusi akan terus terjadi hingga seluruh partikel tersebar luas secara merata atau mencapai keadaan kesetimbangan dimana perpindahan molekul tetap terjadi walaupun tidak ada perbedaan konsentrasi. Jadi pada bidang kontak *viscous finger* sangat berperan dalam peningkatan kecepatan reaksi, semakin luas bidang kontak maka keliling bidang kontak yang terbentuk semakin panjang dan mengakibatkan proses difusi akan berlangsung lebih cepat. Namun sebaliknya, jika bidang kontak yang terbentuk semakin pendek maka daerah kontak reaksi akan semakin kecil sehingga difusi akan berjalan lebih lama.

Fenomena pembentukan bidang kontak tidak terlepas dari bentuk finger yang terbentuk, semakin kecil atau sempit pada celah antara batang finger dan ujung finger maka proses difusi yang akan terjadi dapat berjalan lebih cepat akibat adanya tegangan permukaan. Pada tegangan permukaan ini, semakin kecil panjang (dalam hal ini jari-jari finger) maka energi aktivasi (tegangan permukaan) yang nantinya akan terbentuk akan semakin besar. Hal ini dapat dilihat pada persamaan berikut ini :

$$\sigma = \frac{F}{L}$$

Dimana,

σ = tegangan permukaan (N/m)

F = gaya (Newton)

L = panjang permukaan selaput fluida (m)

Bila tegangan permukaan ini di konversikan kedalam energi tiap satuan luas (J/m^2) maka energi yang terbentuk akan tak terhingga bila luasnya mendekati nol ($A \approx 0$). Oleh karena itu, tegangan permukaan ini mempunyai peranan yang penting dalam pembentukan energi aktivasi pada proses difusi (reaksi) nantinya.

Selain itu, viskositas pada fluida juga ikut mempengaruhi kecepatan perambatan bidang kontak antara fluida satu dengan fluida yang lain, dimana kecepatan perambatan bidang kontak tersebut akan mempengaruhi nilai dari *capillary number*. *Capillary number* digunakan untuk menyatakan pelepasan pada fluida yang masih tertahan didalam media berpori (*hele shaw cell*). *Capillary number* adalah fungsi dari kecepatan (v) yang mendesak pergerakan pada fluida yang terperangkap dalam media berpori dan viscosity (μ) sebagai tahanan (*resistance*) fluida mengalir.

$$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$$

Dimana :

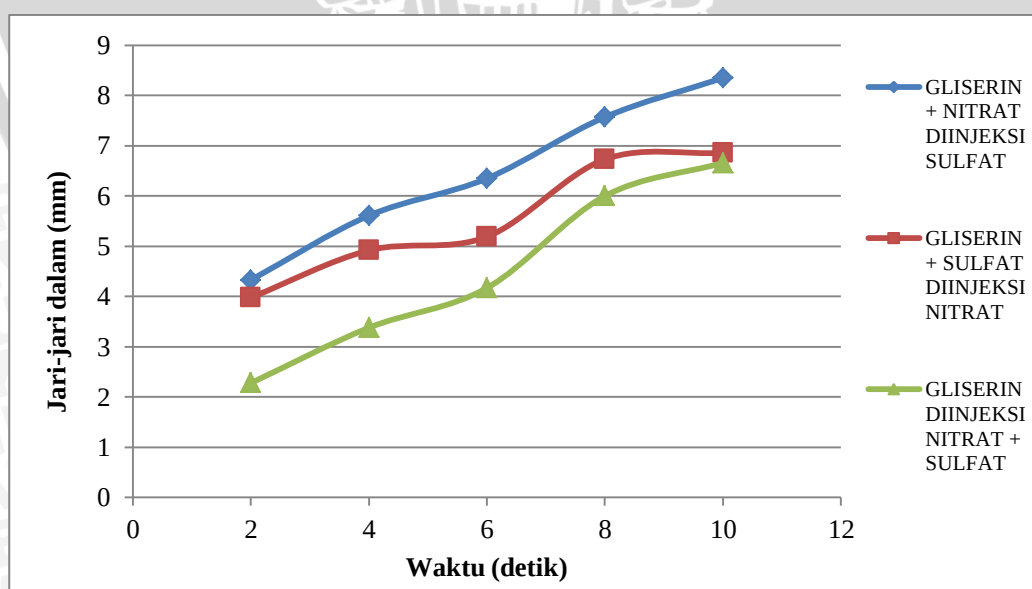
μ = viskositas dinamik larutan (Pa.s)

V = kecepatan perambatan (m/s)

σ = tegangan permukaan (N/m)

Viskositas menjelaskan ketahanan internal fluida untuk mengalir dan mungkin dapat dipikirkan sebagai pengukuran dari pergeseran fluida. Semakin encer larutan yang diinjeksikan kedalam *hele shaw cell* maka *capillary number* juga akan semakin menurun karena viskositas larutan berbanding lurus dengan *capillary number*. Karena fluida tidak mengalir ke dalam media berpori tetapi pada fluida juga, akibatnya viskositas fluida yang terdesak tidak boleh diabaikan. *Capillarity number* kita tinjau dari kedua sisi fluida, baik dari fluida pendesak maupun fluida yang terdesak. Semakin tinggi viskositas larutan pendesak bila dibandingkan dengan fluida yang terdesak mengakibatkan pembentukan *finger* yang lebih pendek. Begitu pula sebaliknya, karena hubungan antara *capillarity number* (Ca) dengan *instability wave-length* / lebar *finger* (λ) berbanding terbalik.

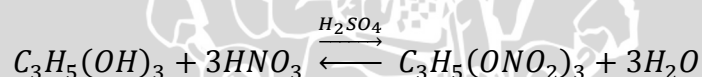
4.2.3 Hubungan antara jari-jari dalam *viscous finger* dengan waktu pembentukan pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam *hele shaw cell*.



Gambar 4.1 Grafik hubungan jari-jari dalam *viscous finger* terhadap waktu pembentukan *viscous finger*

Dari data yang telah didapatkan dapat diperoleh hubungan jari-jari dalam *viscous finger* terhadap waktu pembentukan seperti ditunjukkan pada gambar 4.1, dimana semua variasi cara pencampuran antara gliserin, asam sulfat dan asam nitrat pada *hele shaw cell* menunjukkan tren yang terus meningkat. Ini berarti bahwa semakin bertambah waktu maka diikuti dengan bertambahnya panjang jari-jari dalam *viscous finger*. Pada cara pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat terlihat jelas perbedaan panjang jari-jari dalam *viscous finger* yang terbentuk dari $t = 2$ sampai dengan $t = 10$. Perubahan panjang jari-jari dalam pada cara pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat sebagai fungsi waktu (t) secara berurutan dari jari-jari dalam yang terpanjang sampai jari-jari dalam yang terpendek adalah gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat, gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat serta gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat.

Pada cara pencampuran gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat, jari-jari *viscous finger* mengalami perubahan yang paling signifikan. Hal ini dikarenakan pada pencampuran gliserin dan asam nitrat pada *hele shaw cell*, viskositas larutan yang terbentuk relatif lebih rendah dibandingkan dengan cara pencampuran yang lain. Pembentukan jari-jari dalam *viscous finger* lebih panjang dari yang lain disebabkan oleh adanya proses pembentukan nitrogliserin.

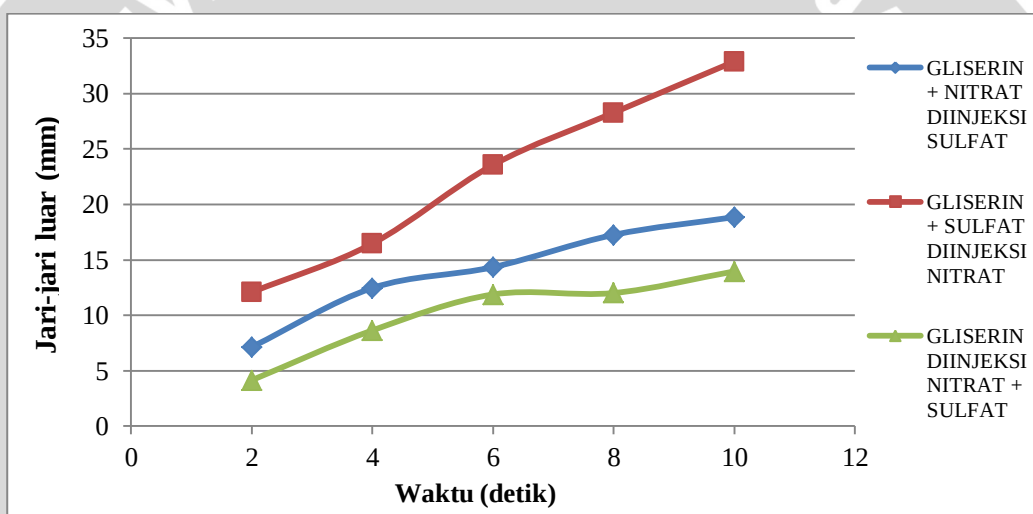


Akibat reaksi diatas, asam sulfat yang diinjeksi langsung kontak dengan campuran gliserin dan asam nitrat sehingga pada pencampuran ini cenderung lebih mudah untuk bereaksi daripada pembentukan jari-jari akibat ketidakstabilan antarmuka. Ketidakmampuan asam sulfat untuk mendesak gliserin + asam nitrat juga menjadi penyebab pembentukan jari-jari dalam lebih panjang dari pada yang lainnya. Itulah mengapa, pada cara pencampuran antara gliserin + asam nitrat yang diinjeksikan asam sulfat cenderung mengumpul ke dalam.

Asam sulfat memiliki viskositas paling rendah dari campuran jika dibandingkan dengan asam nitrat dan gliserin, sedangkan viskositas nitrat lebih encer dari gliserin dan lebih kental dari asam sulfat. Sehingga apabila semakin banyak asam sulfat yang tercampur ke dalam gliserin, maka akan mengencerkan larutan gliserin dan asam sulfat. Hal tersebut jelas mempengaruhi viskositas dinamik dari campuran gliserin dan asam sulfat sebagai fluida yang mengalami pendesakan.

Sedangkan pada cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat serta gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat, cenderung mempunyai tren yang sama. Namun pada cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat mempunyai dua kali penurunan pembentukan jari-jari dalam *viscous finger* yaitu pada $t = 6$ dan $t = 10$ serta mempunyai selisih pembentukan jari-jari dalam yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan cara pencampuran gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat. Hal ini disebabkan adanya penyusutan pembentukan jari-jari dalam akibat adanya pengalihan fungsi pembentukan jari-jari dalam ke jari-jari luar *viscous finger*.

4.2.4 Hubungan antara jari-jari luar *viscous finger* dengan waktu pembentukan *viscous finger* pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam *hele shaw cell*.



Gambar 4.2 Grafik hubungan jari-jari luar *viscous finger* terhadap waktu pembentukan *viscous finger*

Pada gambar 4.2 dijelaskan hubungan jari-jari luar *viscous finger* terhadap waktu pembentukan *viscous finger*, dimana dapat dilihat proses pembentukan jari-jari luar *viscous finger* pada berbagai variasi cara pencampuran mulai dari *finger* dengan ukuran terpendek sampai dengan terbentuk *finger* dengan ukuran jari-jari yang semakin panjang. Perubahan jari-jari *viscous finger* ini merupakan fungsi waktu, dimana jika waktunya semakin bertambah maka pembentukan jari-jari luar *viscous finger* juga akan semakin memanjang. Terlihat jelas bahwa pada grafik diatas urutan pembentukan jari-jari luar mulai dari yang terpendek sampai yang terpanjang adalah gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat, gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat serta gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat pada durasi waktu 2 sampai 10 detik.

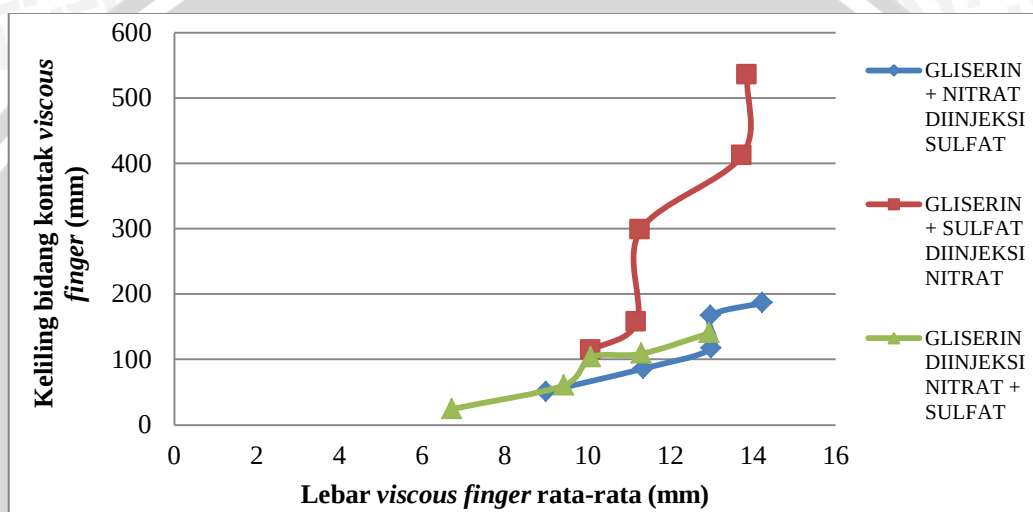
Pada cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat, jari-jari luar *viscous finger* mengalami perubahan yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan pada cara pencampuran ini ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*) lebih besar akibat dari viskositas yang semakin menurun sehingga ketika jumlah asam nitrat yang diinjeksikan habis, *finger* yang terbentuk cenderung panjang dan kompleks. Selain itu, difusi pada larutan penginjeksi dan yang terdesak sangatlah besar. Asam nitrat sebagai fluida yang diinjeksi, fluida ini mudah menembus campuran gliserin dan asam sulfat sehingga *finger* yang terbentuk sangatlah panjang. *Finger* yang terbentuk bukanlah semata-mata murni asam nitrat, melainkan telah mendapatkan tambahan volume campuran gliserin dan asam sulfat akibat difusi yang terjadi baik di atas, tengah ataupun bawah permukaan *hele shaw cell*. Akibat dari viskositas larutan yang didesak semakin turun (encer) sehingga kemampuan pendesakan asam nitrat yang diinjeksikan semakin bertambah dan terbentuklah jari-jari luar *finger* yang paling panjang dari cara pencampuran yang lainnya. Selain jari-jari *finger* utama yang panjang, juga terbentuk jari-jari luar *finger* percabangan yang relatif banyak yang disebut *dendrite*. Pembentukan *dendrite* dapat disebabkan pendesakan tidak stabil antarmuka (*interfacial instability*) akibat proses pendesakan fluida yang kurang kental oleh fluida lain yang tidak kental dan *capillarity number* sudah mencapai batas sehingga memungkinkan pembentukan *dendrite*.

Panjang jari-jari luar *finger* yang terpendek yaitu pada cara pencampuran gliserin diinjeksi asam nitrat dan asam sulfat. Hal ini disebabkan oleh tingginya viskositas pada fluida terdesak yang berakibat larutan pendesak (asam nitrat + asam sulfat) kesulitan untuk menerobos gliserin. Pada pencampuran asam sulfat dan asam nitrat akan membentuk air sehingga pada campuran ini akan lebih encer, sehingga viskositasnya lebih encer dan *viscous finger* yang terbentuk lebih pendek.

Sedangkan pada cara pencampuran gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat, pembentukan ketidakstabilan antar muka (*interfacial instability*) relatif tidak mengalami peningkatan yang disebabkan oleh penurunan viskositas dinamik didalam *hele shaw cell* karena penambahan asam nitrat kedalam gliserin. Namun, peningkatan pembentukan jari-jari luar *finger* ini tidak lebih panjang jika pada *hele shaw cell* diinjeksikan asam sulfat karena viskositas asam sulfat lebih encer jika dibandingkan dengan viskositas asam nitrat.

4.2.5 Hubungan antara keliling bidang kontak *viscous finger* terhadap lebar *viscous finger* rata-rata ($W_{0 \text{ rata-rata}}$) pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam *hele shaw cell*.

Keliling bidang kontak *viscous finger* diperoleh dari hasil pengukuran pada data gambar visualisasi proses pembentukan *viscous finger* mulai dari $t = 2$ s sampai dengan $t = 10$ s. Sedangkan lebar *viscous finger* rata-rata ($W_{0 \text{ rata-rata}}$) merupakan 0.5 dari jumlah keliling lingkaran luar dan keliling lingkaran dalam, dibagi dengan jumlah gelombang *viscous finger*. Sedangkan hubungan dari keduanya dapat dilihat pada grafik dibawah ini.



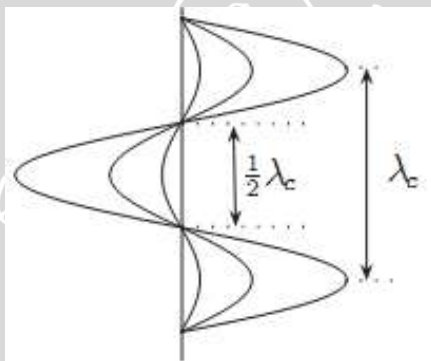
Gambar 4.3 Grafik hubungan keliling bidang kontak *viscous finger* terhadap lebar *viscous finger* rata-rata.

Dari grafik 4.3 di atas dapat dilihat bahwa $W_{0 \text{ rata-rata}}$ (lebar *viscous finger* rata-rata) mempengaruhi keliling bidang kontak *viscous finger* yang terbentuk antara ketiga cara pencampuran. Pada ketiga cara pencampuran, semakin kecil lebar *viscous finger* rata-rata yang terbentuk pada batas *interface* antara fluida dalam *hele shaw cell* dan fluida yang diinjeksikan semakin kecil pula begitu pula sebaliknya.

Keliling bidang kontak *viscous finger* yang terbentuk dengan cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat memiliki lebar *viscous finger* rata-rata lebih besar jika dibandingkan dengan cara pencampuran yang lain. Hal ini dikarenakan pada cara pencampuran ini ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*) lebih besar akibat dari viskositas gliserin + asam sulfat yang semakin menurun sehingga ketika jumlah asam nitrat yang diinjeksikan habis *finger* yang terbentuk cenderung panjang dan kompleks. Selain itu, proses difusi antar larutan penginjeksi dan yang terdesak sangatlah besar. Asam nitrat yang diinjeksikan fluida mudah menembus dan berdifusi

dengan campuran gliserin dan asam sulfat sehingga *finger* yang terbentuk sangatlah panjang. Oleh karena itu pula, keliling bidang kontak yang terbentuk juga semakin panjang.

Pada pencampuran dengan cara gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat dan gliserin diinjeksi asam sulfat + asam nitrat, ketidakstabilan antarmuka (*interfacial instability*) yang terjadi lebih kecil. Hal ini menyebabkan terbentuknya lebar *viscous finger* yang sempit dengan ukuran yang lebih pendek. Selain itu apabila kita amati pada kedua cara pencampuran ini, larutan penginjeksi cenderung tidak menyebar dalam *hele shaw cell* melainkan cenderung mengumpul. Fenomena ini terjadi akibat fluida yang diinjeksikan sulit untuk menerobos larutan yang akan didesak karena larutan dalam *hele shaw cell* lebih kental daripada larutan yang diinjeksikan. Meskipun demikian, proses difusi tetap terjadi tetapi lebih lambat jika dibandingkan dengan cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat.



Gambar 4.4 *Instability wave-length*/ panjang gelombang kritis.

Hal ini sesuai dengan teori pada pembentukan *viscous finger* yang menunjukkan bahwa lebar *finger* (W_0) adalah setengah dari panjang gelombang kritis/ *instability wave-length* (λ_c), yang dirumuskan :

$$\lambda_c = \pi \cdot b \sqrt{\frac{\sigma}{\mu V}}$$

$$W_0 = \frac{1}{2} \lambda_c.$$

Dimana :

λ_c = *instability wave-length* / lebar *finger* (m)

π = 3,14

b = lebar celah antar plat / *hele shaw cell* (m)

σ = *surface tension* (N/m)

μ = viskositas dinamik fluida dalam *hele shaw cell* (Pa.s)

V = kecepatan antarmuka (m/s)

W_0 = lebar *finger* (mm)

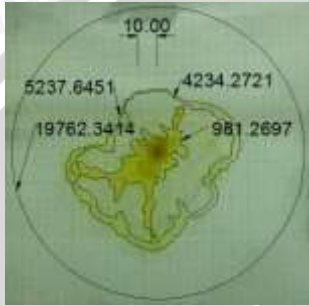
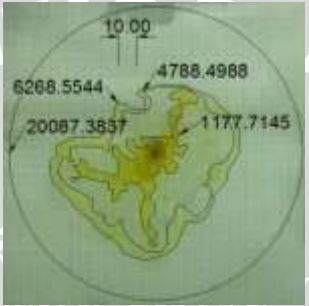
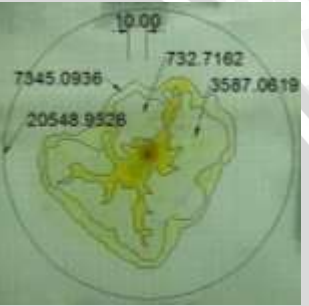
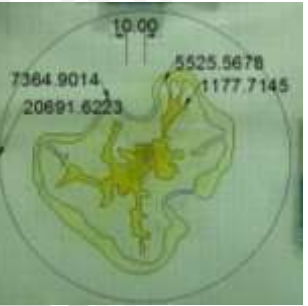
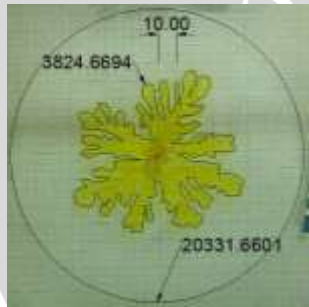
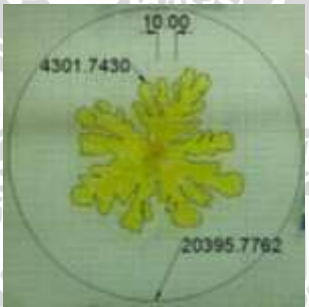
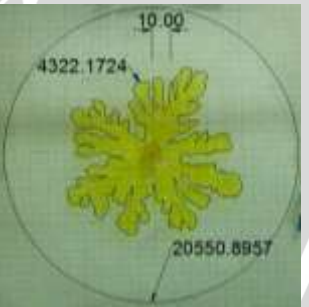
Sehingga semakin tinggi viskositas dinamik fluida dalam *hele shaw cell* (μ) maka akan menghasilkan *instability wave-length*/ panjang gelombang kritis (λ_c) yang lebih kecil dan kompleks sehingga *perimeter viscous finger* (keliling bidang kontak) besar, demikian pula sebaliknya.

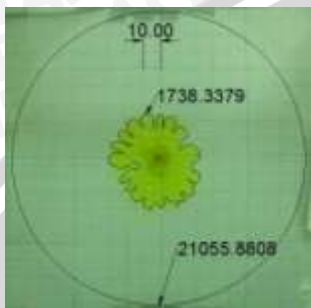
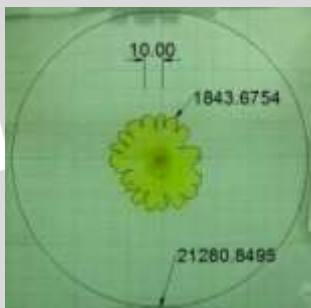
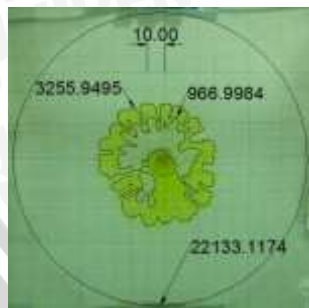
4.2.6 Perubahan bentuk daerah reaksi pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam *hele shaw cell*.

Untuk mengetahui seberapa besar perubahan bentuk daerah reaksi pada cara pencampuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat dapat dilihat pada tabel dibawah ini.



Tabel 4. 4 Perubahan bentuk daerah reaksi pada berbagai cara pencampuran asam nitrat, asam sulfat dan gliserin dalam *hele shaw cell*.

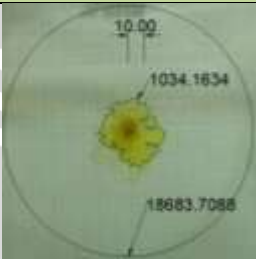
Waktu (detik)		1050	1250	1450	1650
Gliserin + Asam Nitrat Diinjeksi Asam Sulfat					
Luas (mm ²)	Gliserin + Asam Nitrat	14524.6963	13818.8293	13203.8590	13326.7209
	Daerah Campuran	1984.6427	2657.7701	3025.3155	3017.0481
	Daerah Reaksi	3253.0024	3610.7843	4319.7781	4347.8533
Gliserin + Asam Sulfat Diinjeksi Asam Nitrat					
Luas (mm ²)	Gliserin + Asam Sulfat	16506.9907	16094.0332	16228.7233	16178.9567
	Daerah Campuran	3824.6694	4301.7430	4322.1724	4442.5976
	Daerah Reaksi	0	0	0	0

Gliserin Diinjeksi Asam Nitrat + Asam Sulfat					
Luas (mm ²)	Gliserin	19317.5429	19437.1741	19411.7624	18877.1679
	Daerah Campuran	1738.3379	1868.5026	1915.7100	2288.9511
	Daerah Reaksi	0	0	412.6042	966.9984

Dari hasil penelitian seperti ditunjukkan pada table 4.4, dapat diketahui bahwa pada waktu yang sama diketahui perbedaan dari luas daerah reaksi pada tiap-tiap cara pencampuran. Mulai dari 1050 detik dengan variasi penambahan waktu pengamatan sebesar 200 detik, dapat diketahui bahwa daerah reaksi yang paling luas sampai paling sempit diperoleh pada pencampuran gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat, gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat dan gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat.

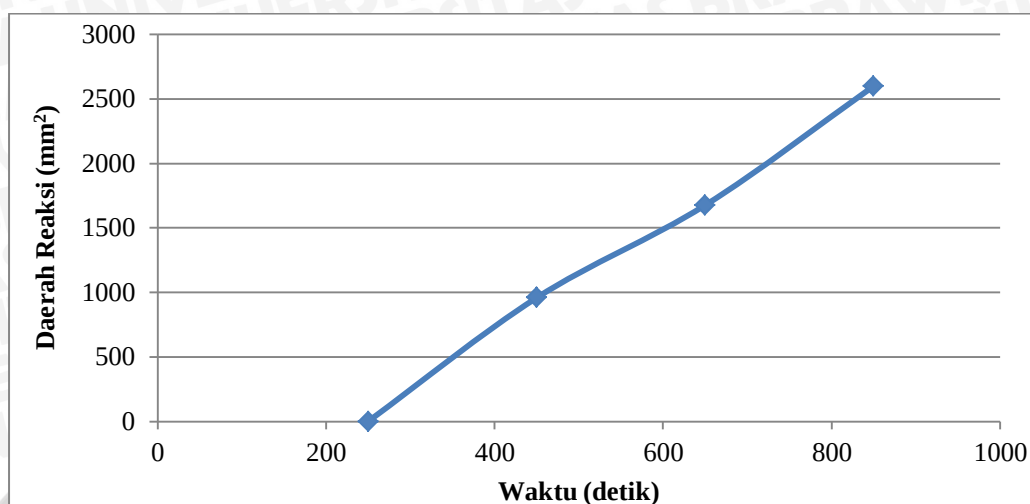
Pada cara pencampuran gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat daerah reaksi yang terbentuk pada $t = 1050$ detik seluas 3253.0024 mm^2 . Namun untuk lebih jelas kapan awal dari pembentukan daerah reaksi dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.5 Visualisasi bentuk daerah reaksi gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat

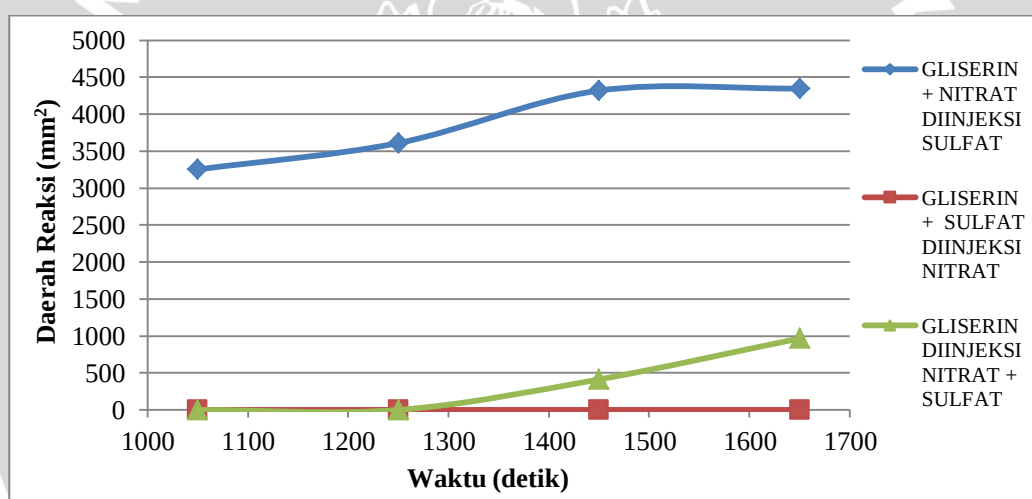
Waktu (detik)	Visualisasi Bentuk	Luas (mm^2)		
		Gliserin + Asam Nitrat	Daerah Campuran	Daerah Reaksi
250		17649.5454	1034.1634	0
450		168445.5447	1217.3519	958.1738
650		16301.3534	1434.3013	1676.0453
850		15311.8466	1690.0143	2599.3551

Pada table 4.5 diatas, dapat dijelaskan kapan awal proses pembentukan daerah reaksi cara pencampuran gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat yaitu dimulai pada $t = 250$

detik dengan peningkatan waktu pengamatan selama 200 detik. Untuk lebih ditailnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.5 Grafik hubungan luas daerah reaksi gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat terhadap waktu



Gambar 4.6 Grafik hubungan luas daerah reaksi terhadap waktu

Saat $t = 200$ terlihat bahwa daerah reaksi belum terbentuk sama sekali. Namun, seiring dengan bertambahnya waktu dapat kita lihat bahwa penambahan luas daerah reaksi sangat signifikan. Pada cara pencampuran ini berlangsung paling cepat dan daerah reaksi berlangsung dari bagian dalam *viscous finger* bukan pada daerah tepi *viscous finger*. Meskipun reaksi awal sudah terbentuk (saat pencampuran sebelum diinjeksi 2 menit 8 detik), reaksi yang terjadi relatif lambat karena tanpa adanya penambahan katalisator yaitu asam sulfat. Setelah penginjeksian selesai dengan waktu 10 detik, barulah terbentuk reaksi nitrase yang cepat akibat penambahan katalisator (asam sulfat). H_2SO_4 menerobos kedalam campuran $C_3H_5(OH)_3 + HNO_3$ saat asam sulfat (H_2SO_4) diinjeksikan melewati pusat *viscous finger*, maka terjadi pencampuran yang

mengakibatkan banyak molekul yang bertemu HNO_3 sehingga akan membentuk NO_2^+ . Di sekeliling $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ yang ikut terlarut sehingga akan mempercepat terbentuknya $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$. Selain ion-ion nitronium yang terbentuk akibat proses *fingering*, pertemuan $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ juga akan menghasilkan $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OSO}_3\text{H})_3$ sebelum terbentuknya nitrogliserin. Ion nitronium akan sangat reaktif bila bertemu dengan $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OSO}_3\text{H})_3$ sehingga percepatan proses reaksi pun dapat terjadi.

Hampir sama dengan cara pencampuran gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat, proses pembentukan daerah reaksi dari dalam *viscous finger*. Sebelum $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ diinjeksikan, pada pencampuran ini telah bereaksi untuk menghasilkan NO_2^+ , H_2O dan HSO_4^- . Ketika diinjeksikan NO_2^+ akan bereaksi dengan gliserin menjadi $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3 + \text{H}_2\text{O}$. Disisi lain asam sulfat dan asam nitrat tercampur secara homogen sehingga viskositas campuran menjadi encer, selain itu efek dari pencampuran asam ini mengakibatkan penambahan air sehingga viskositas menjadi lebih encer. Adanya H_2O mengakibatkan laju difusi ke daerah reaksi melemah dan memperlambat reaksi. Pada cara pencampuran ini reaksi baru terjadi saat $t = 1450$ detik dengan luas daerah reaksi sebesar 412.6042 mm^2 .

Pada cara pencampuran gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat, tidak terbentuk daerah reaksi sama sekali pada saat $t = 1050$ detik sampai $t = 1650$ detik. Meskipun pada campuran ini dapat membentuk $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OSO}_3\text{H})_3$, reaksi pembentukan $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$ relatif paling lama. Hal ini dikarenakan pada cara pencampuran ini, perbandingan antara fungsi katalisator (asam sulfat) dengan gliserin yang dicampurkan dalam *hele shaw cell* sangatlah kecil yaitu dengan perbandingan $0.25 : 5$ atau $1 : 20$. Sehingga proses terjadinya reaksi relatif lebih lama dari pada cara pencampuran yang lainnya yaitu yaitu 2 jam 36 menit 17detik barulah terjadi awal reaksi.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari pengamatan dan analisis terhadap grafik hasil percobaan, maka dapat ditarik kesimpulan pengaruh cara pencampuran terhadap ketidakstabilan antarmuka (*interfacial stability*) antara gliserin, asam nitrat dan asam sulfat sebagai berikut:

1. Dari pengamatan terhadap proses perkembangan *finger*, dapat diketahui bahwa proses difusi berjalan seiringan dengan penginjeksian larutan kedalam *hele shaw cell*, sehingga dapat diketahui jika proses difusi berjalan dua arah yaitu antara larutan yang diinjeksikan dengan larutan yang berada dalam *hele shaw cell*.
2. Jari-jari dalam yang terpanjang sampai jari-jari dalam yang terpendek adalah gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat, gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat serta gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat.
3. Jari-jari luar yang terpendek sampai yang terpanjang adalah gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat, gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat serta gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat.
4. Pada cara pencampuran gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat terjadi pembentukan ion NO_2^+ (nitronium ion) dan air, sehingga pembentukan air akan menghambat NO_2^+ untuk bereaksi karena akan mengencerkan reaktan. Namun, apabila NO_2^+ yang bersifat reaktif bertemu dengan $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OSO}_3\text{H})_3$ akan memacu reaksi berlangsung lebih cepat dan ini terjadi pada cara pencampuran gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat.

5.2 Saran

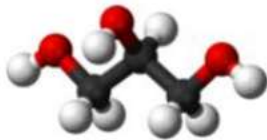
1. Perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh perbandingan konsentrasi antara gliserin + asam nitrat yang diinjeksi asam sulfat agar mendapatkan *finger* yang baik namun reaksi berjalan lebih cepat.
2. Perlunya dilakukan analisis secara matematik untuk setiap cara pencampuran untuk melihat kesamaan pola antara hasil eksperimen dan analisis secara matematik.
3. Diharapkan pada setiap cara pencampuran dilakukan analisis secara semi eksperimental yaitu dengan menggunakan software (Fluent, ANSYS CFX maupun ANSYS Polyflow) untuk melihat kesamaan pola *viscous finger* yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian Bowyer.2005. *Open RP project*.http://blog.reprap.org/2005_03_01_archive.html (diakses 15 November 2011)
- Anonymous^a. 2011. Diffusion. www.encyclopedia.thefreedictionary.com/diffusion. (diakses 17 November 2011)
- Anonymous^b. 2011. *Stopwatch & Timer*. <http://www.gd-wholesale.com/wholesale-dir/a21c/e1141f/stopwatch-timer-s-2.html>
- Anonymous^c. 2011. *Gliserol*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Glycerol>. (diakses 9 Oktober 2011)
- Anonymous^d. 2011. *Asam Nitrat*. http://id.wikipedia.org/wiki/Asam_nitrat. (diakses 9 Oktober 2011)
- Anonymous^e. 2011. *Asam Sulfat*. http://id.wikipedia.org/wiki/Asam_sulfat. (diakses 9 Oktober 2011)
- Anonymous^f. 2011. *Nitroglycerin*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Nitroglycerin>. (diakses 9 Oktober 2011)
- Badger Army Ammunition Plan In Sauk County, Wisconsin, USA. 2002. *Explosive Decomposition And Detonation Process Information*. Submitted By. Plexus Scientific Corporation.
- Biasutti, G.S. 1985. *History Of Accidents In The Explosives Industry*. Self-publishing house, Vevey, Switzerland. reviewed in "Propellants and Explosives" no. 6 (1981), p. 88
- Daccord G, Nittmann J & Stanley. 1986. *Radial Viscous Finger And Diffusion-Limited Aggregation : Fractal Dimension And Grow Sites*. Physical Review Letter, Volume 56, Number 4.
- Egah, Ancala. 2011. *Pengaruh Perbandingan Konsentrasi Asam Nitrat (HNO₃) Dan Asam Sulfat(H₂SO₄) Terhadap Interfacial Instability*. Skripsi. Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
- Eli, Gilje. 2008. *Simulation Of Viscous Instabilities In Miscible And Immiscible Displacement*. Jurnal. University of Bergen, Bergen.
- Herdianto, Wawan. 2010. *Kohesi dan Adhesi*. <http://wawanfisika.wordpress.com/2010/09/30/kohesi-dan-adhesi/>. (diakses 20 November 2011)
- Irfana. 2011. *Irfha Laboratorium Glass Ware*.<http://irfhalaboratorium.indonetwork.co.id/2850492/gelas-ukur.htm> (diakses 20 November 2011)

- Kellay, Hamid. 2011. *Viscous Fingering*. Encyclopedia of Mathematics. http://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Viscous_fingering. (diakses 17 November 2011)
- Li, Shuwang et al. 2009. *Control of Viscous Fingering Patterns in a Radial Hele-Shaw Cell*. PHYSICAL REVIEW LETTERS. PRL102,174501.
- Mandiri, Cipta Pratama. 2010. *Whirl Pool*. http://click-pcm.blogspot.com/2010_11_01_archive.html (diakses 20 Juni 2012)
- Mraz, Stephen J. 2011. *Getting To Know Stepper Motors*. <http://machinedesign.com/article/getting-to-know-stepper-motors-0505> (diakses 20 Juni 2012)
- Nagatsu, Yoichiro & Toshihisa Ueda. 2001. *Effects of Reactant Concentrations on Reactive Miscible Viscous Fingering*. AIChE Journal Volume 47, Issue 8, pages 1711–1720.
- Nekrasov, Boris. 1960. *Hydraulics For Aeronautical Engineers*. Peace Publishers. Muscow.
- Santoso, Budi et al. 2010. *Atwood Number In Reaction Of Glyserol Nitration*. Journal of Mathematics and Technology, ISSN: 2078-0257, No.5, December, 2010.
- Streeter, Victor. L & E. Benjamin Wylie. 1996. *Mekanika Fluida*. Mc Graw Hill Book Company, New York.
- Vondenhoff, Erwin. 2009. *Hele-Shaw And Stokes Flow With A Source Or Sink : Stability Of Spherical Solutions*. Technische Universiteit Eindhoven, Netherland.
- White, Frank M. 1994. *Fluid Mechanics 4 Edition*. New York: Mc Graw-Hill.
- Zaidar, Emma. 2003. *Nitrogliserin Dapat Digunakan Sebagai Bahan Peledak*. Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sumatera Utara.

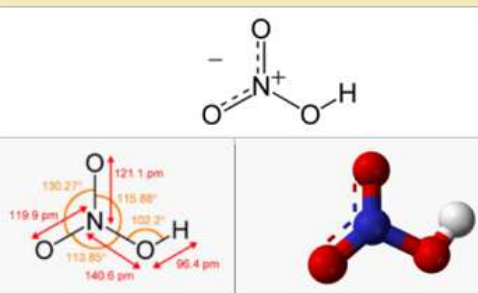
Lampiran 1. Sifat-sifat gliserin

Glycerol		Properties	
$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2-\text{OH}$		Molecular formula	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$
		Molar mass	92.09 g mol^{-1}
		Appearance	clear, colorless solid hygroscopic
IUPAC name propane-1,2,3-triol		Odor	odorless
Other names glycerin glycerine 1,2,3-propanetriol 1,2,3-triglycerol 1,2,3-trihydroxypropane glyceritol glyceryl alcohol		Density	1.261 g/cm^3
Identifiers		Melting point	17.8°C , 291.0 K , 64.0°F
CAS number	56-81-5	Boiling point	290°C , 563 K , $554^\circ\text{F}^{[1]}$
PubChem	753	Refractive index(n_D)	1.4746
ChemSpider	733	Viscosity	$1.412 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{[2]}$
UNII	PDC6A3C0OX	Hazards	
DrugBank	DB04077	MSDS	External MSDS
KEGG	D00028	NFPA 704	
ChEBI	CHEBI:17522	Flash point	160°C (closed cup) 176°C (open cup)
ChEMBL	CHEMBL692	Supplementary data page	
ATC code	A06AG04,A06AX01,QA16QA03	Structure and properties	n , ϵ , etc.
Jmol-3D images	Image 1	Thermodynamic data	Phase behaviour Solid, liquid, gas
		Spectral data	UV, IR, NMR, MS
		Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25°C , 100 kPa)	

Gambar : Glycerol

Sumber : Anonymous^c (2011)

Lampiran 2. Sifat-sifat asam nitrat

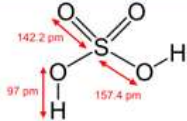
ASAM NITRAT		Bahaya	
		Klasifikasi EU	Oksidan (O) Korosif (C)
		NEPA 704	
		Frasa-R	Templat: R8, R35
		Frasa-S	(S1/2), S23, S26, S36, S45
		Titik nyala	tidak tersedia
Identifikasi		Senyawa terkait	
Nama IUPAC Asam nitrat Nama lain <i>Hydrogen Nitrat</i>		Senyawa terkait Asam nitrit Dinitrogen oksida Dinitrogen pentoksida	
Nomor CAS	[7697-37-2]	Kecuali dinyatakan sebaliknya, data di atas berlaku pada temperatur dan tekanan standar (25°C, 100 kPa)	
Nomor RTECS	QU5775000		
SMILES	O[N+](=O)[O-]		
Sifat			
Rumus molekul	HNO ₃		
Massa molar	63,012 g/mol		
Penampilan	Cairan bening tidak berwarna		
Densitas	1,51 g/cm ³ , cairan tidak berwarna		
Titik leleh			
Titik didih	(120.5 °C (larutan 68%))		
Kelarutan dalam air	tercampurkan		
Viskositas	? cP at ? °C		
Momen dipol	2,17 ± 0,02 D		

Gambar : Asam nitrat

Sumber : Anonymous^d (2011)



Lampiran 3. Sifat-sifat asam sulfat

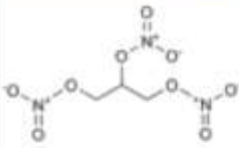
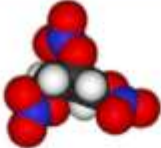
ASAM SULFAT		Bahaya	
		MSDS	ICSC 0362
		Klasifikasi EU	Korosif (C)
Nama IUPAC Asam sulfat		Indeks EU	016-020-00-8
Nama lain Minyak vitriol		NFPA 704	
Identifikasi		Frasa-R	R35
Nomor CAS	[7664-93-9]	Frasa-S	(S1/2), S26, S30, S45
Nomor EINECS	231-639-5	Titik nyala	tak ternyalakan
Nomor RTECS	WS5600000	Senyawa terkait	
Sifat		Asam kuatterkait	Asam selenat Asam klorida Asam nitrat
Rumus molekul	H ₂ SO ₄	Senyawa terkait	Asam sulfat Asam peroksomonosulfat Sulfur trioksida Oleum
Massa molar	98,08 g/mol	Kecuali dinyatakan sebaliknya, data di atas berlaku pada temperatur dan tekanan standar (25°C, 100 kPa)	
Penampilan	cairan bening, tak berwarna, tak berbau		
Densitas	1,84 g/cm ³ , cair		
Titik leleh			
Titik didih			
Kelarutan dalam air	tercampur penuh		
Keasaman(pK _a)	-3		
Viskositas	26,7 cP (20 °C)		

Gambar : Asam nitrat

Sumber : Anonymous^e (2011)



Lampiran 4. Sifat-sifat nitrogliserin

Nitroglycerin	
	
	
IUPAC name 1,2,3-Trinitroxypropane	
Systematic name 2,3-Bis (nitrooxy) propyl nitrate	
Other names [hide] 1,3-Dinitrooxypropan-2-yl nitrate Propane-1,2,3-triyl trinitrate	
Identifiers	
CAS number	55-63-0
PubChem	4510
ChemSpider	4354
UNII	G59M7S0WS3
EC number	200-240-8
UN number	0143, 0144, 1204, 3064, 3319
DrugBank	DB00727
KEGG	D00515
MeSH	Nitroglycerin
ChEBI	CHEBI:28787
ChEMBL	CHEMBL730
ATC code	C01DA02,C05AE01
Beilstein Reference	1802063
Gmelin Reference	165859
Properties	
Molecular formula	$C_3N_3H_5O_9$
Molar mass	227.0865 g mol ⁻¹
Exact mass	227.002578773 g mol ⁻¹
Appearance	Colorless liquid
Density	1.6 g cm ⁻³ (at 15 °C)
Melting point	14 °C, 287 K, 57 °F
Boiling point	50-60 °C, 323-333 K, 122-140 °F (decomposes)
log P	2.154

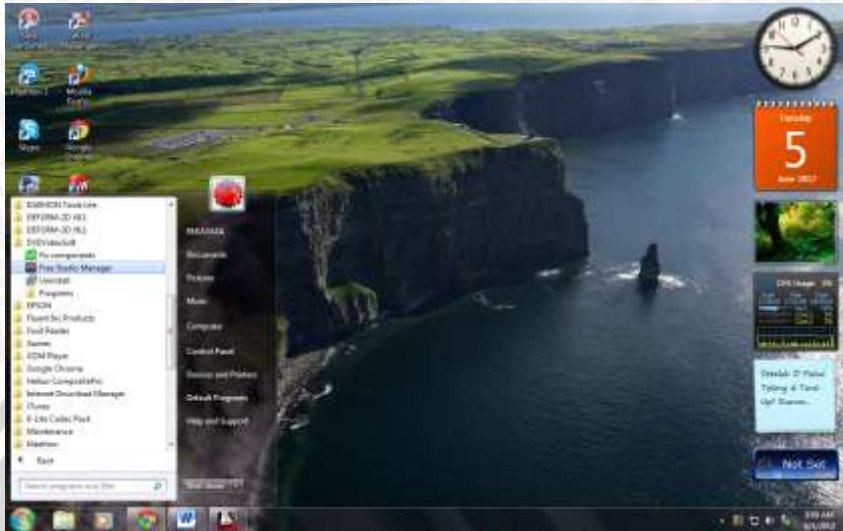
Structure	
Coordination geometry	Tetragonal at C1, C2, and C3 Trigonal planar at N7, N8, and N9
Molecular shape	Tetrahedral at C1, C2, and C3 Dihedral at N7, N8, and N9
Thermochemistry	
Std enthalpy of formation $\Delta_f H^\circ_{298}$	-370 kJ mol ⁻¹
Std enthalpy of combustion $\Delta_c H^\circ_{298}$	-1.529 MJ mol ⁻¹
Pharmacology	
Bioavailability	<1%
Routes of administration	Intravenous, Oral, Sublingual, Topical, Transdermal
Metabolism	Hepatic
Elimination half-life	3 min
Legal status	Pharmacist Only (S3)(AU)
Pregnancy category	C(US)
Explosive data	
Shock sensitivity	high
Friction sensitivity	high
Explosive velocity	7700 m s ⁻¹
RE factor	1.50
Hazards	
EU Index	603-034-00-X
EU classification	E (Explosive)  T+   N
R-phrases	R3, R26/27/28, R33,R51/53
S-phrases	(S1/2), S33, S35,S36/37, S45, S 61
NEPA 704	
Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25 °C, 100 kPa)	

Gambar : Nitrogliserin
Sumber : Anonymous^f (2011)

Lampiran 5. Cara Converter File Video To JPG

Pada proses ini akan dilakukan pengambilan data video yang berupa *frame* gambar dengan menggunakan *Free Manager V5.3.5*.

1. Klik start > all programs > DVDVideoSoft > Free Manager



2. Setelah window muncul, pilih PHOTO & IMAGES



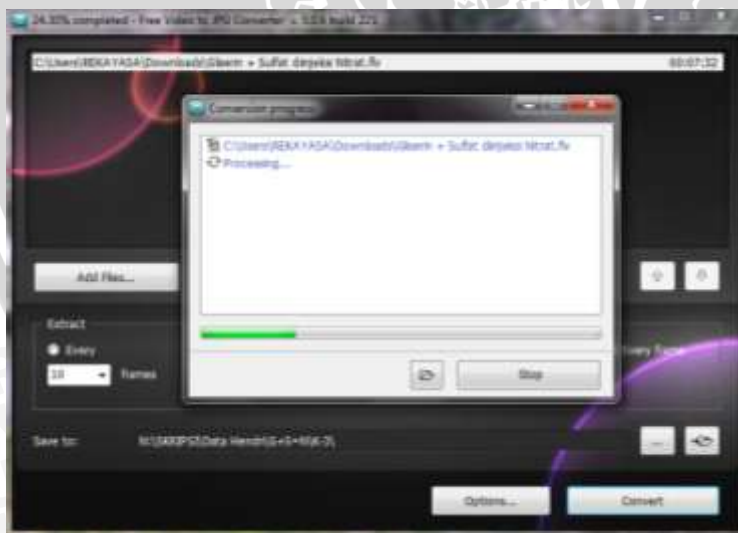
3. Kemudian muncul sub window dari PHOTO & IMAGES > pilih FREE VIDEO to JPG



4. Untuk merubah *file* video ke *picture*, klik *add files...* dari *Free Video to JPG Converter v.5.0.6 build 221* > aturlah di Extraxt untuk pengaturan *frame picture* sesuai yang dikehendaki (pengaturan berdasarkan *every frames*, *evry seconds*, *Total frame from video* atau *evry frame*).



5. Jika sudah selesai dipilih, atur *directory* untuk penyimpanan hasil *converter*. Bila semuanya sudah selesai baru klik *convert* dan secara otomatis *file frame picture* akan tersimpan di *directory* yang telah dibuat sebelumnya.



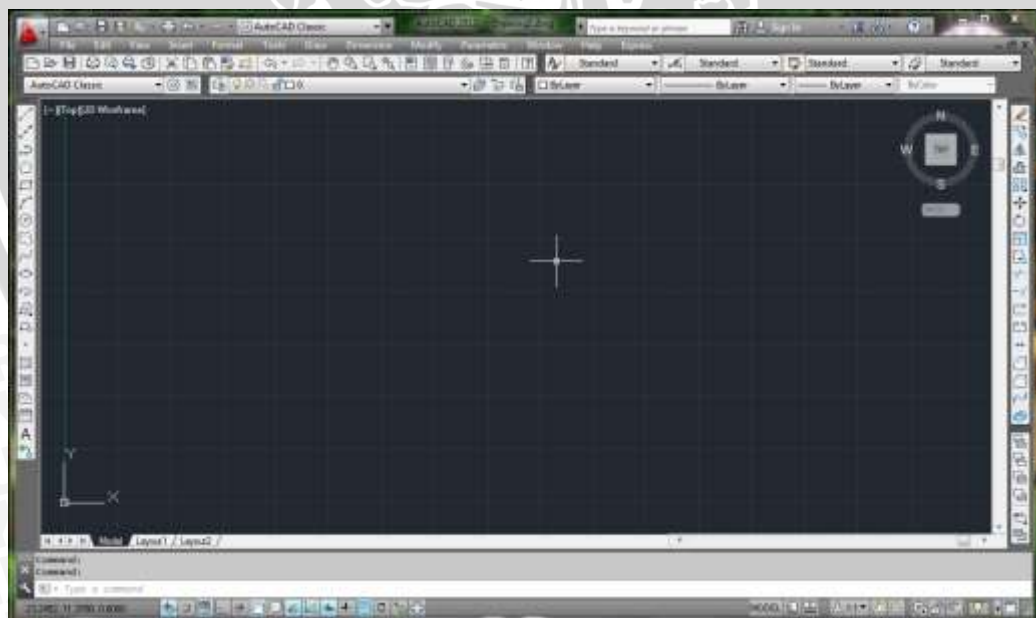
Lampiran 6. Cara pengukuran dengan menggunakan software AUTOCAD

Pada proses ini akan dilakukan pengukuran baik jari-jari *viscous finger* ataupun keliling bidang kontak dan luas daerah reaksi.

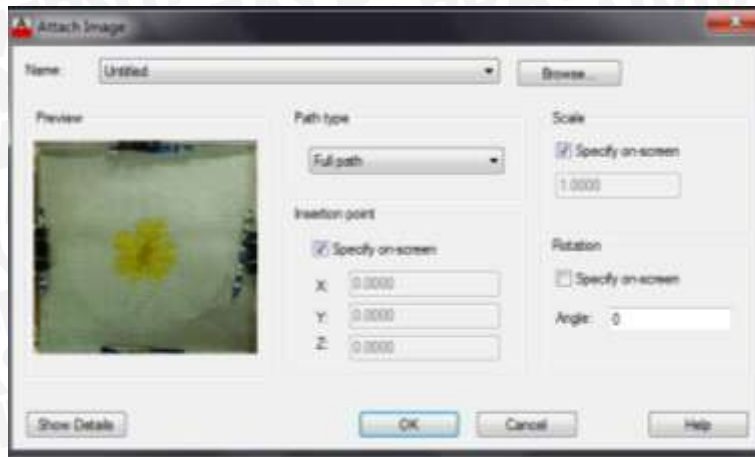
1. Klik start > all programs > Autodesk > AutoCad 2013 – English > AutoCad 2013 – English.exe



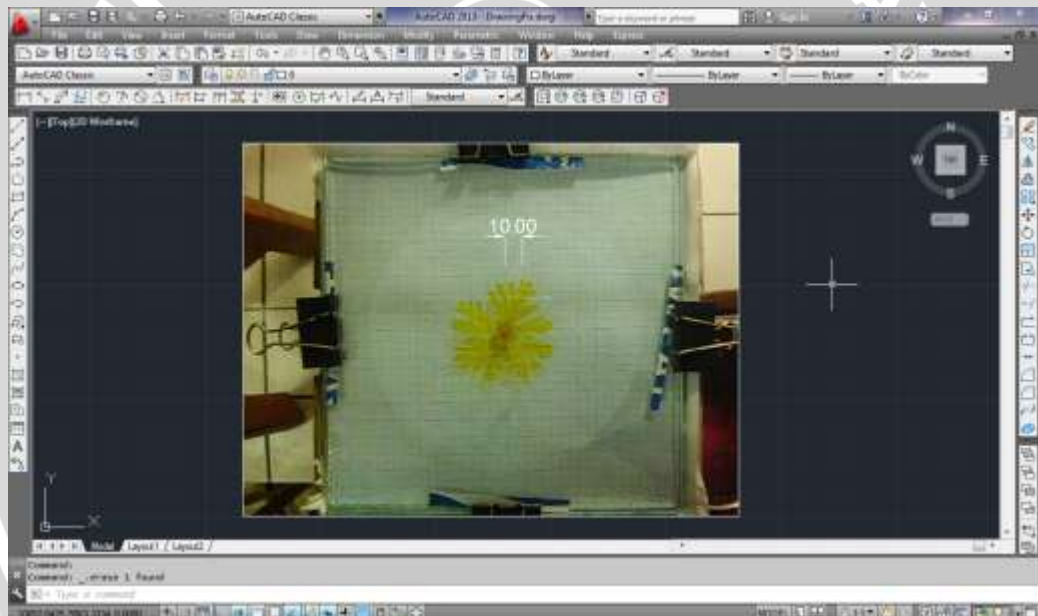
2. Window utama software AutoCad 2013



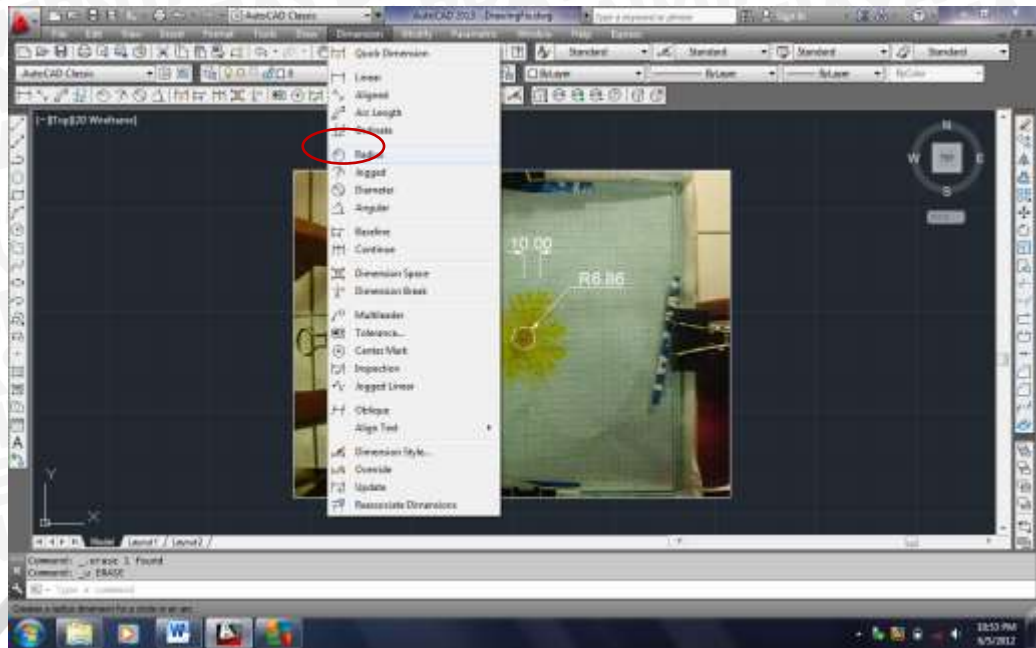
3. Kemudian, untuk pengambilan data kita pilih *Insert > Raster Image Reference...*
> pilih *image/gambar* yang akan di ukur > sehingga muncul *Attach Image* > Ok.



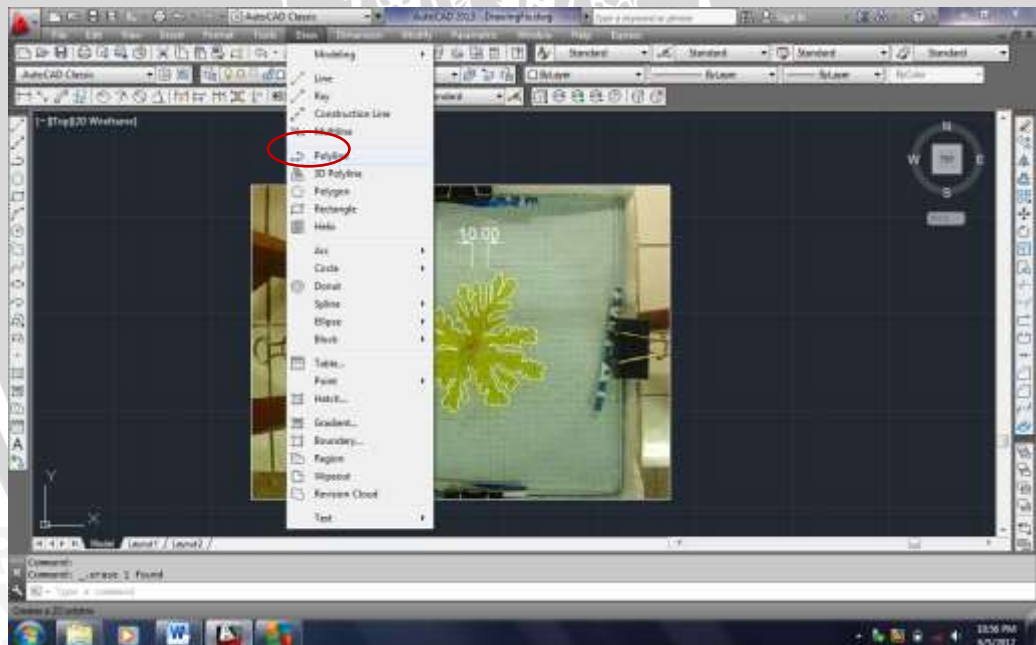
4. Aturlah titik referensi (kondisi aktual saat pengujian) dari *picture* untuk menyamakan dengan kondisi sebenarnya. Disini, titik acuan yang akan digunakan adalah kotak-kotak dari millimeter blok. Jarak yang akan digunakan adalah 10 mm.



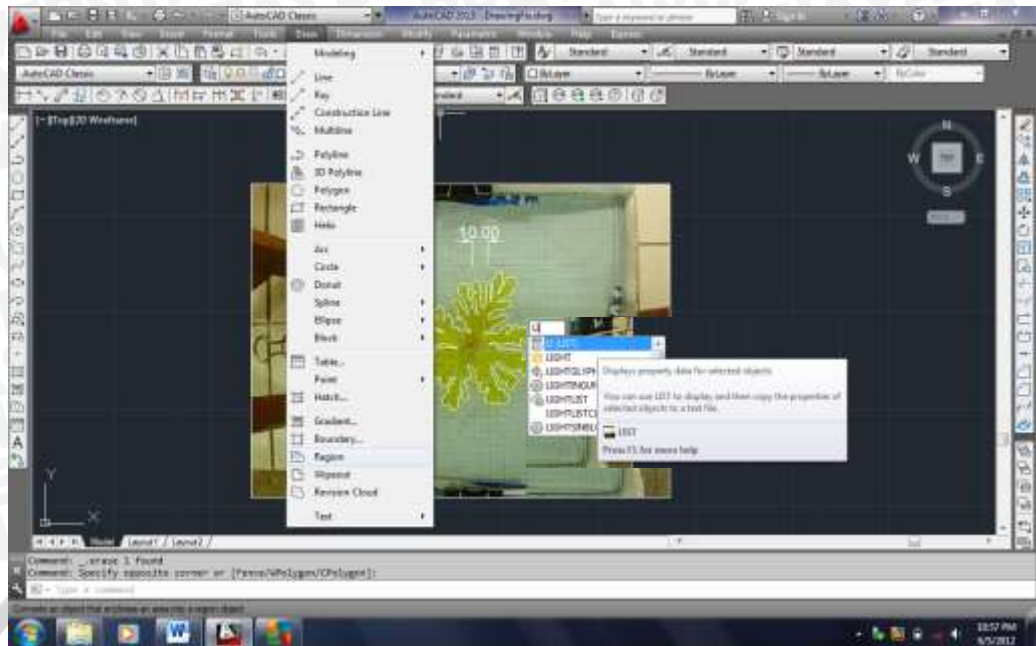
5. Untuk pengukuran panjang jari-jari viscous finger, pusat lingkaran yang akan digunakan adalah lubang dari slang plastik yang telah dipasang pada *hele shaw cell*. Pada toolbar > dimension > pilih radius 



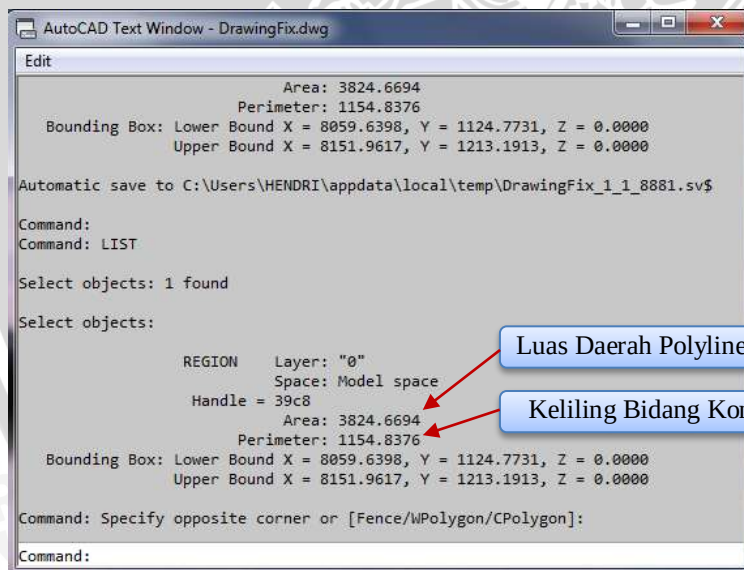
6. Dengan menggunakan polyline kita buat garis paling luar dari *viscous finger* sehingga garis akhir dari polyline bertemu dengan titik awal pembuatan garis barulah kita enter.



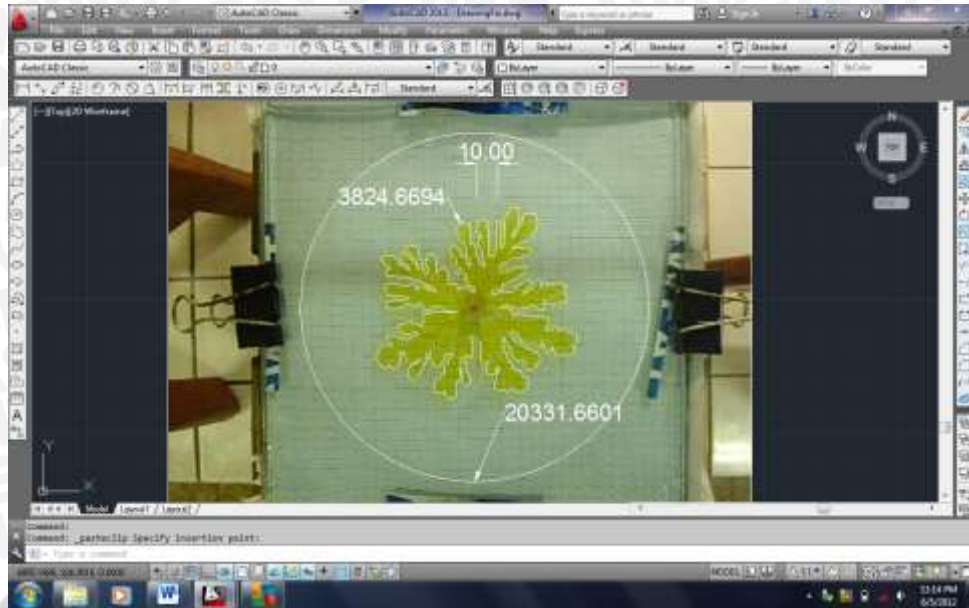
7. Untuk melihat keliling, luas atau volume dari gambar, pada toolbar > tool > region atau comment "reg". Barulah dengan menggunakan comment "list" maka kita akan mendapatkan keliling, luas atau volume dari drawing yang telah dibuat sebelumnya.



8. Untuk memberikan dimension, pada toolbar > dimension > multileader > pilih line/area/volume dari drawing yang akan diberi ukuran. Dari hasil data list kemudian kita copy data yang sesuai barulah kita paste pada teks dimension (multileader) tadi.

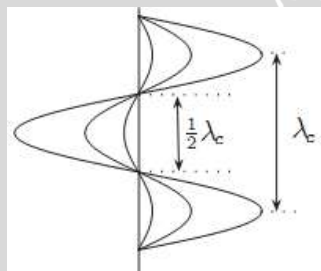


9. Sehingga tampilan akhirnya seperti pada gambar dibawah ini.



10. Sedangkan untuk pengukuran hubungan keliling bidang kontak *viscous finger* terhadap lebar *viscous finger* rata-rata seperti pada gambar dibawah ini.

Cara pengukuran lebar *viscous finger* rata-rata :



$$W_0 \text{ rata-rata} = \frac{W_0 \text{ total}}{n}$$

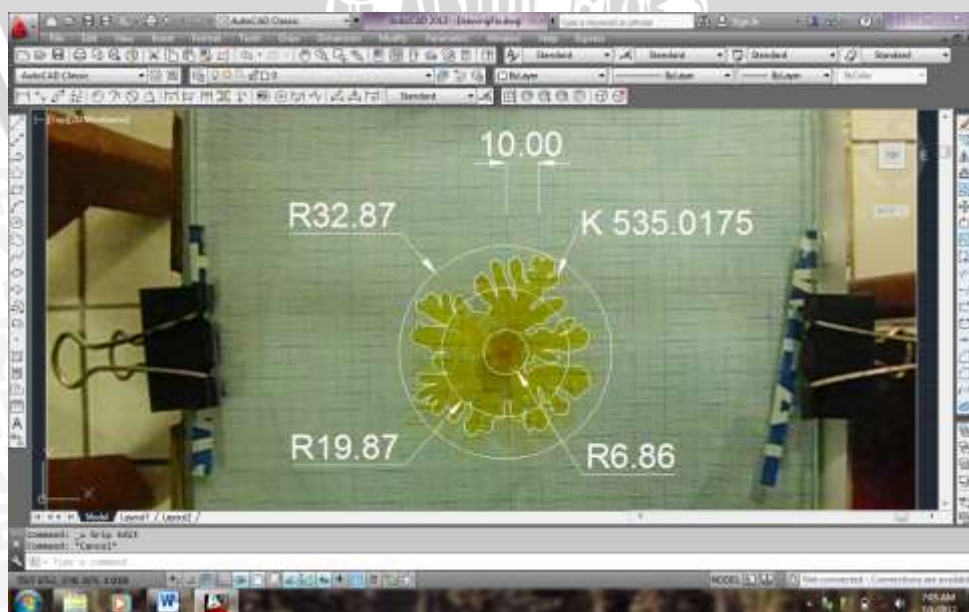
$$W_0 \text{ total} = 2 \cdot \pi \cdot 3,14 \cdot \frac{(R_L + R_D)}{2}$$

Dimana :

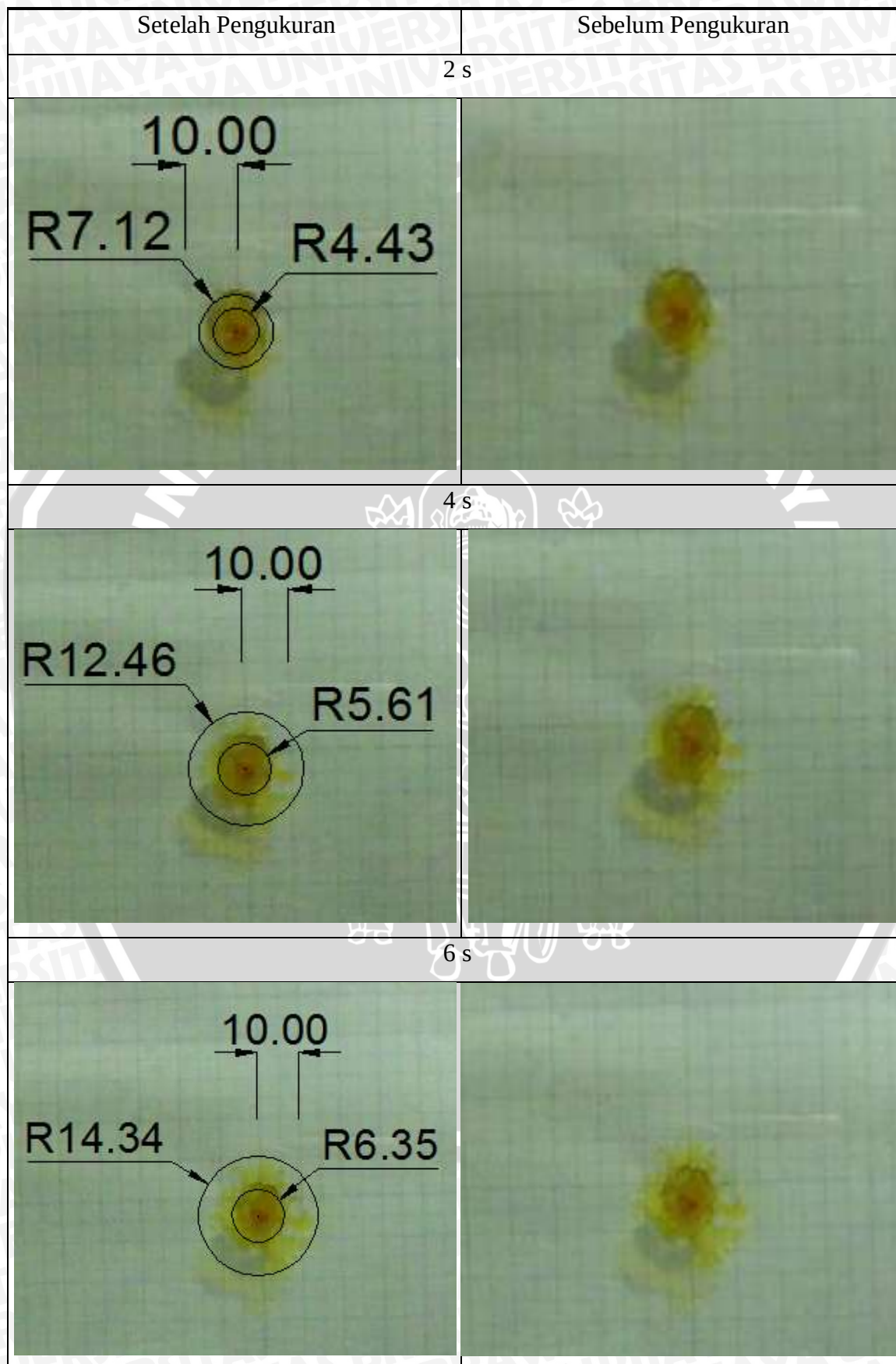
R_L = jari-jari luar (mm)

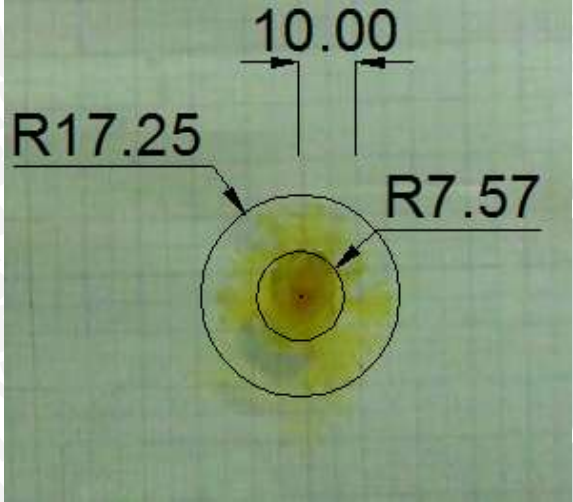
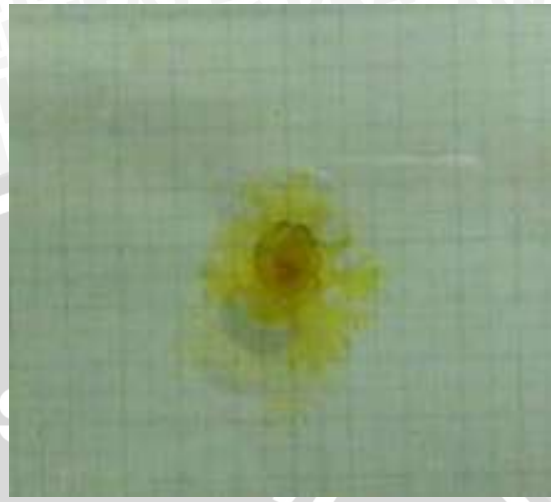
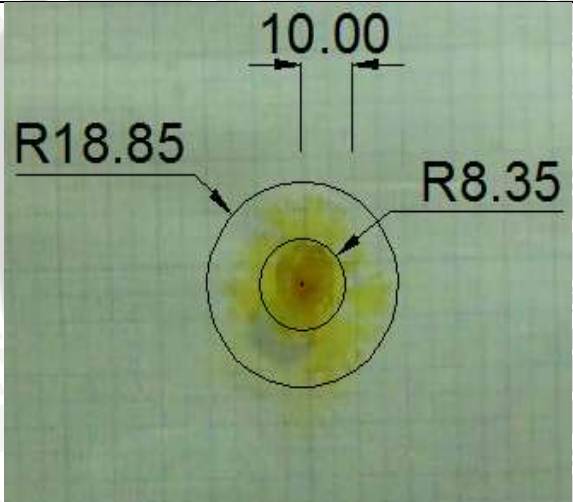
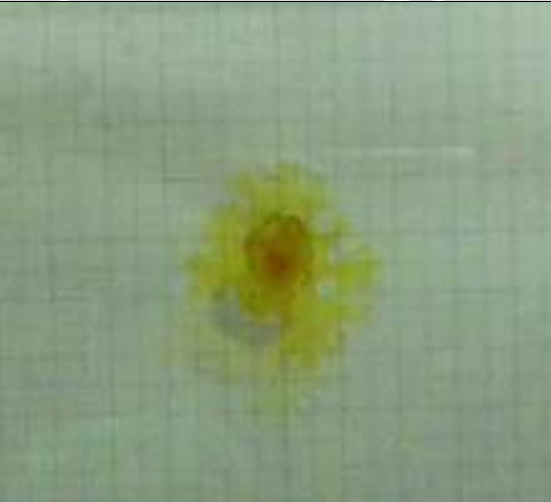
R_D = jari-jari dalam (mm)

n = jumlah gelombang (mm)

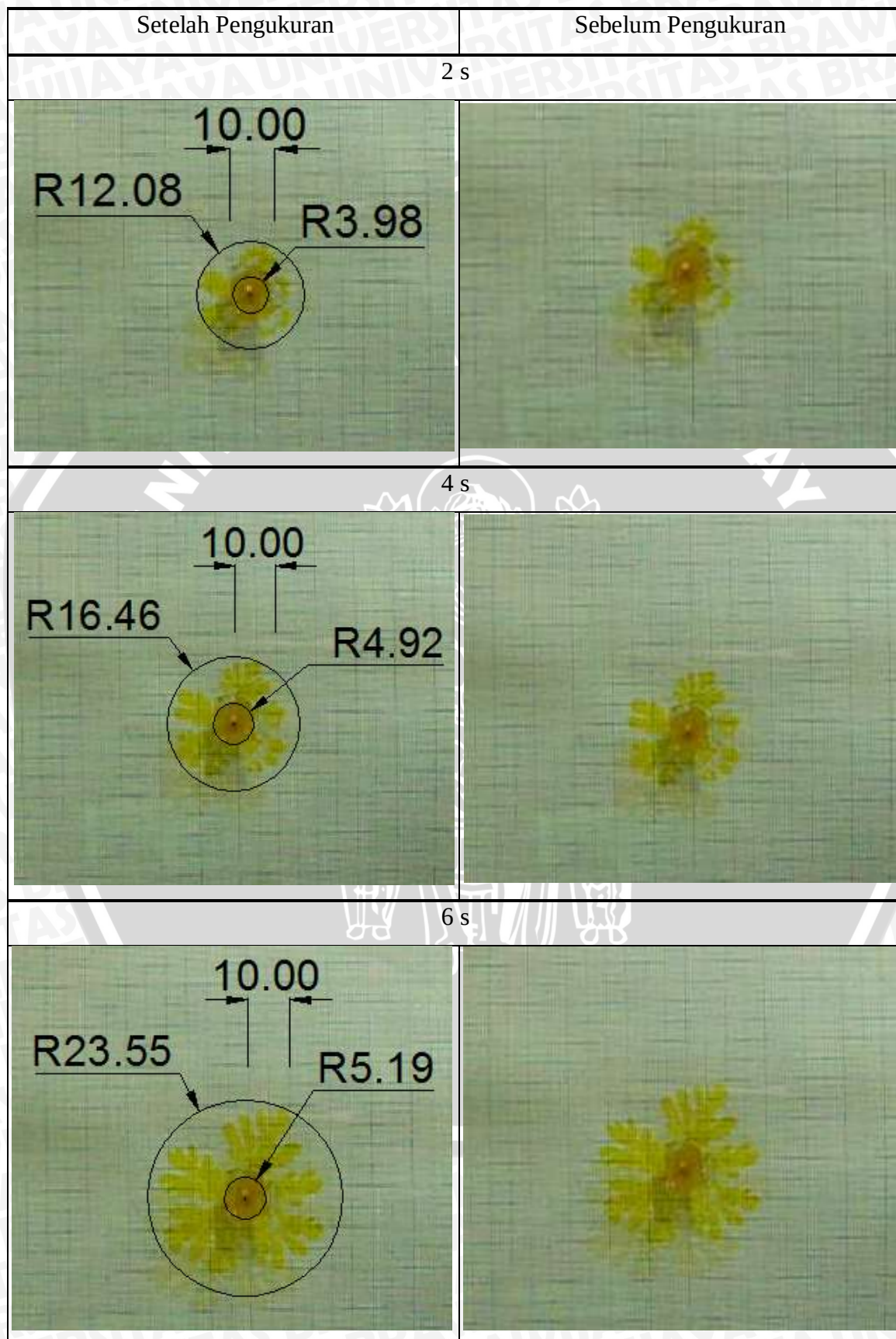


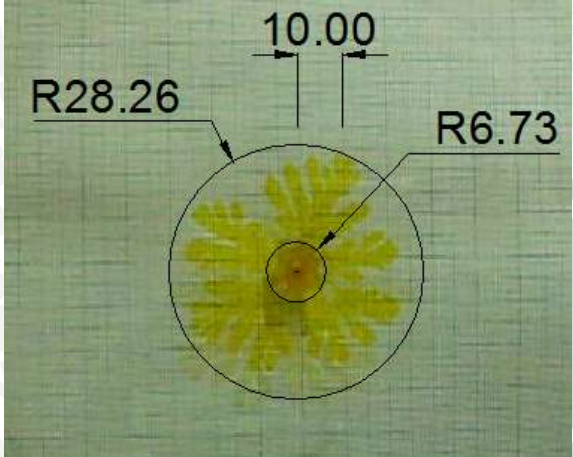
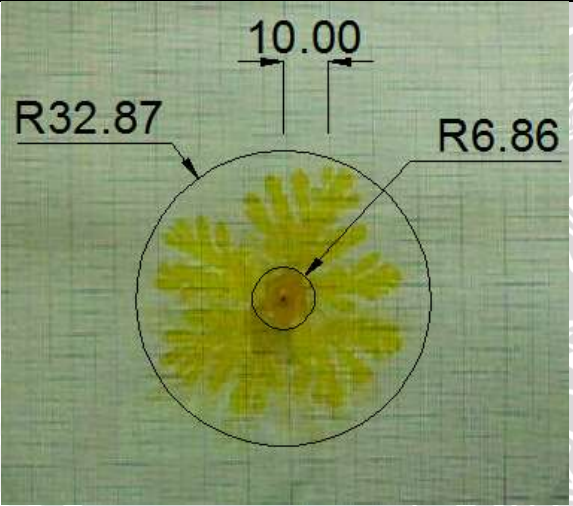
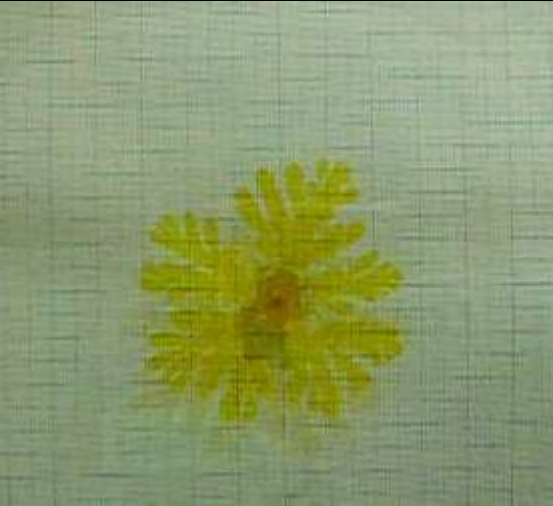
Lampiran 7. Visualisasi pembentukan *interfacial instability* (viscous finger) dalam *hele shaw cell* gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat



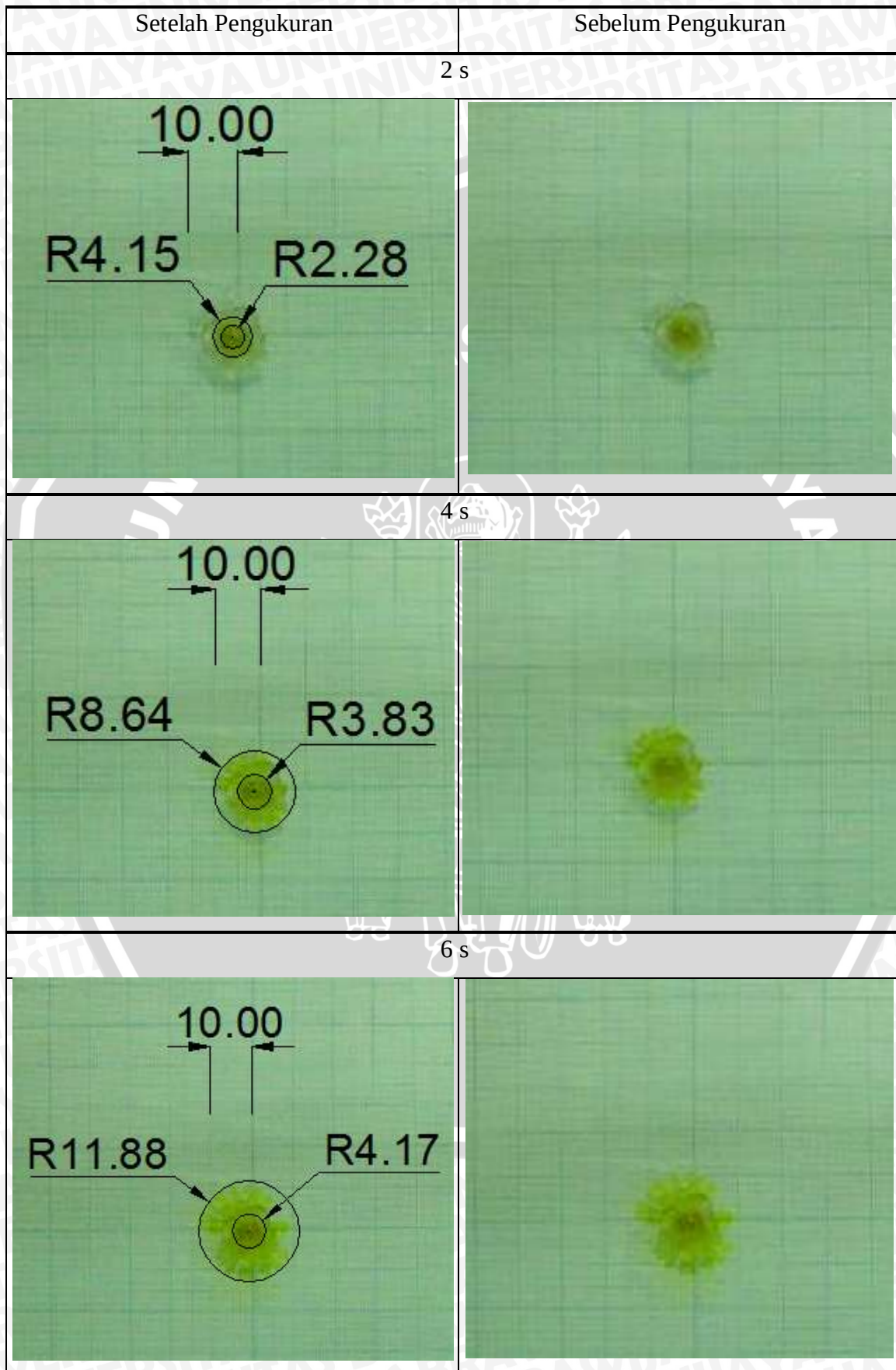
Setelah Pengukuran	Sebelum Pengukuran
8 s	
	
10 s	
	

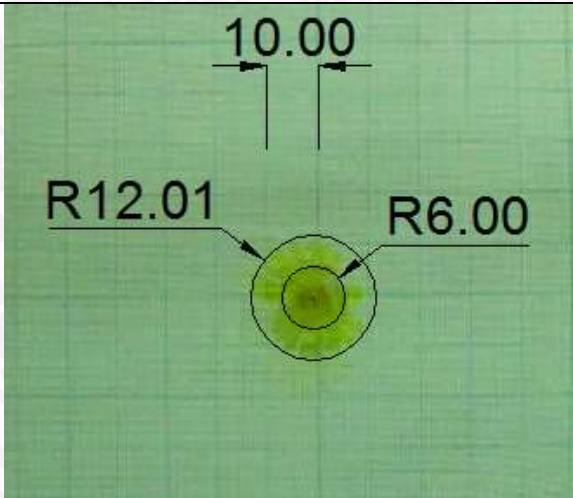
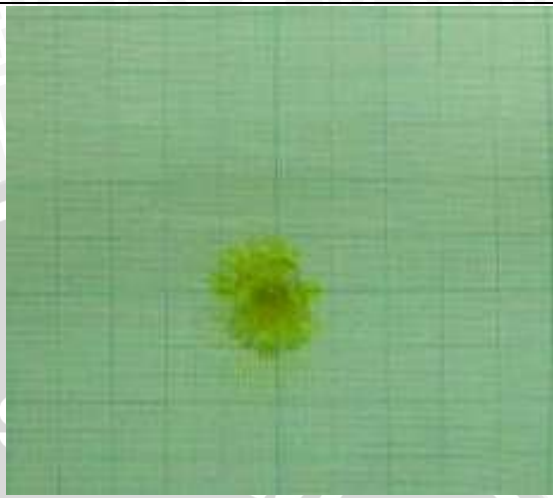
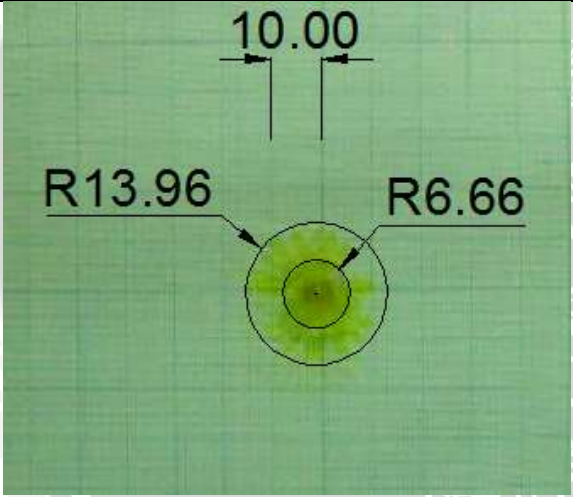
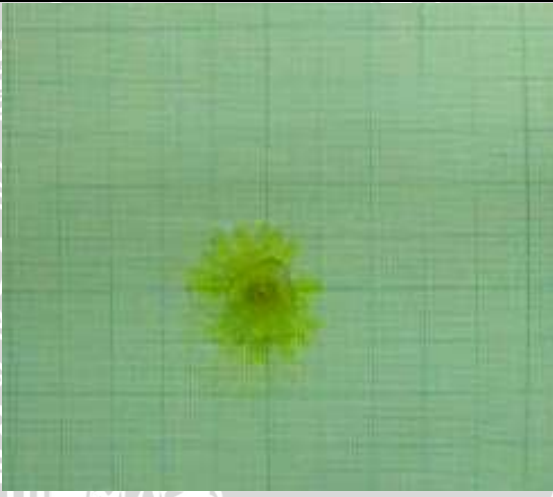
Lampiran 8. Visualisasi pembentukan *interfacial instability* (*viscous finger*) dalam *hele shaw cell* gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat



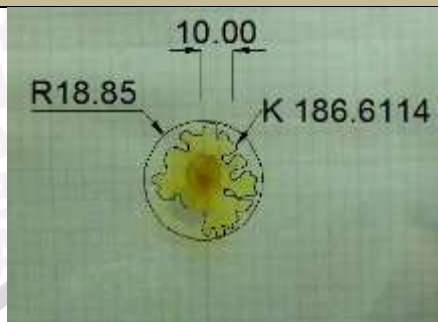
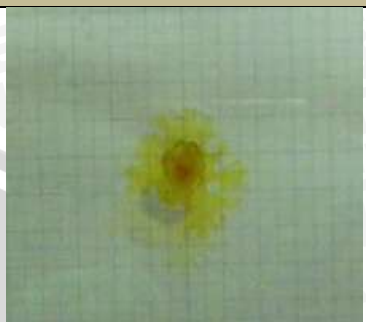
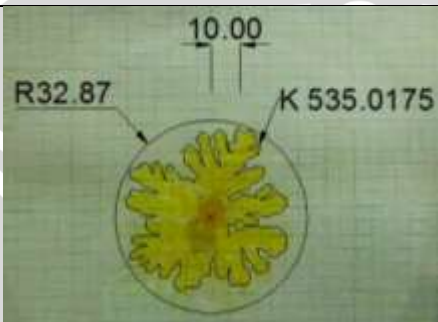
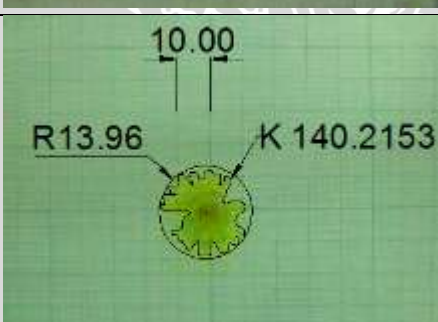
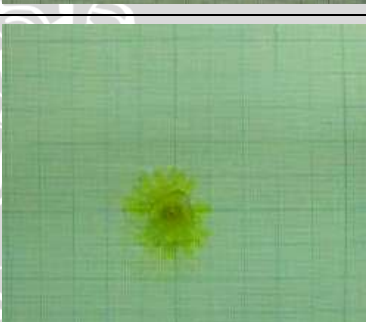
Setelah Pengukuran	Sebelum Pengukuran
8 s	
	
10 s	
	

Lampiran 9. Visualisasi pembentukan *interfacial instability* (*viscous finger*) dalam *hele shaw cell* gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat

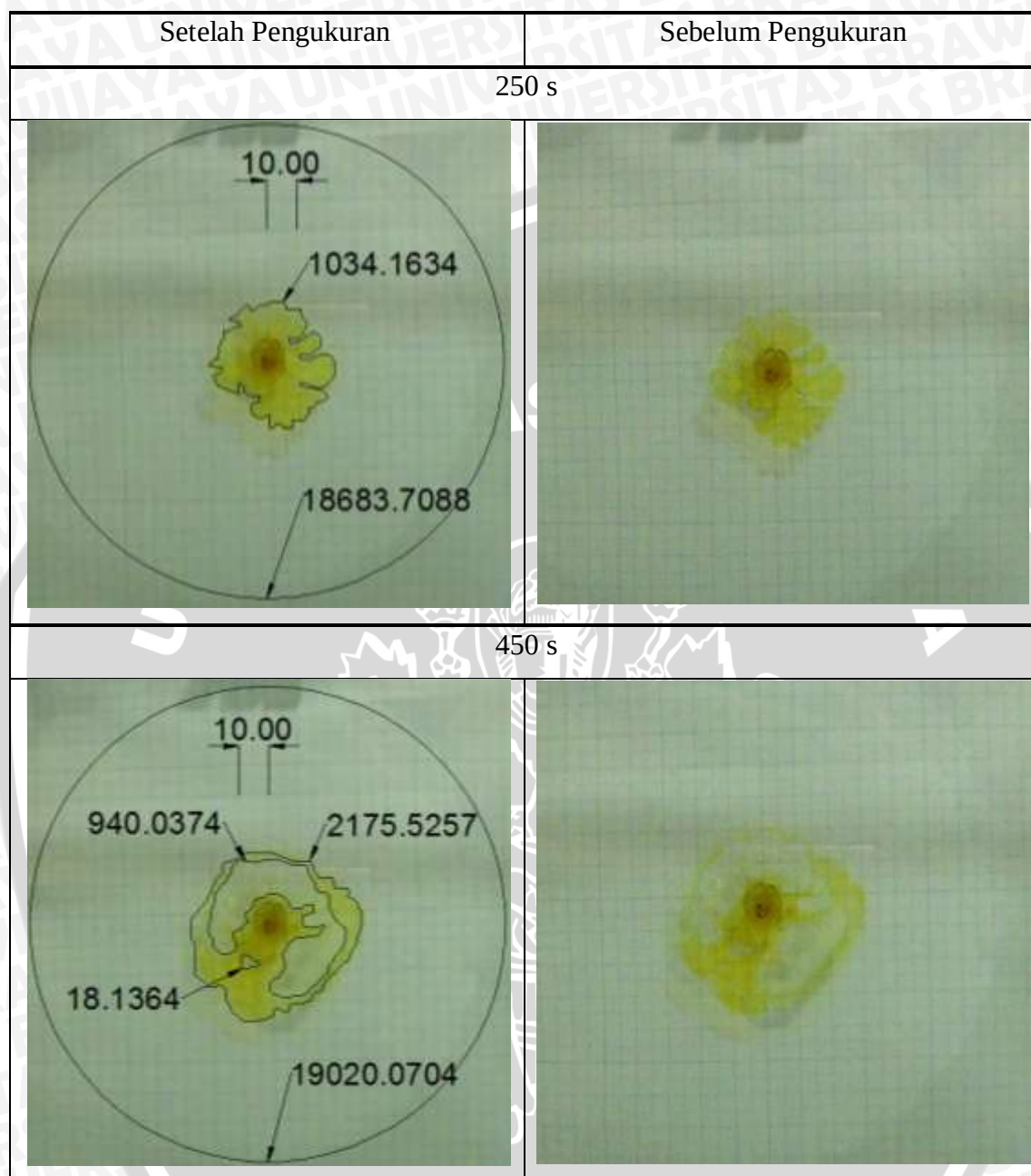


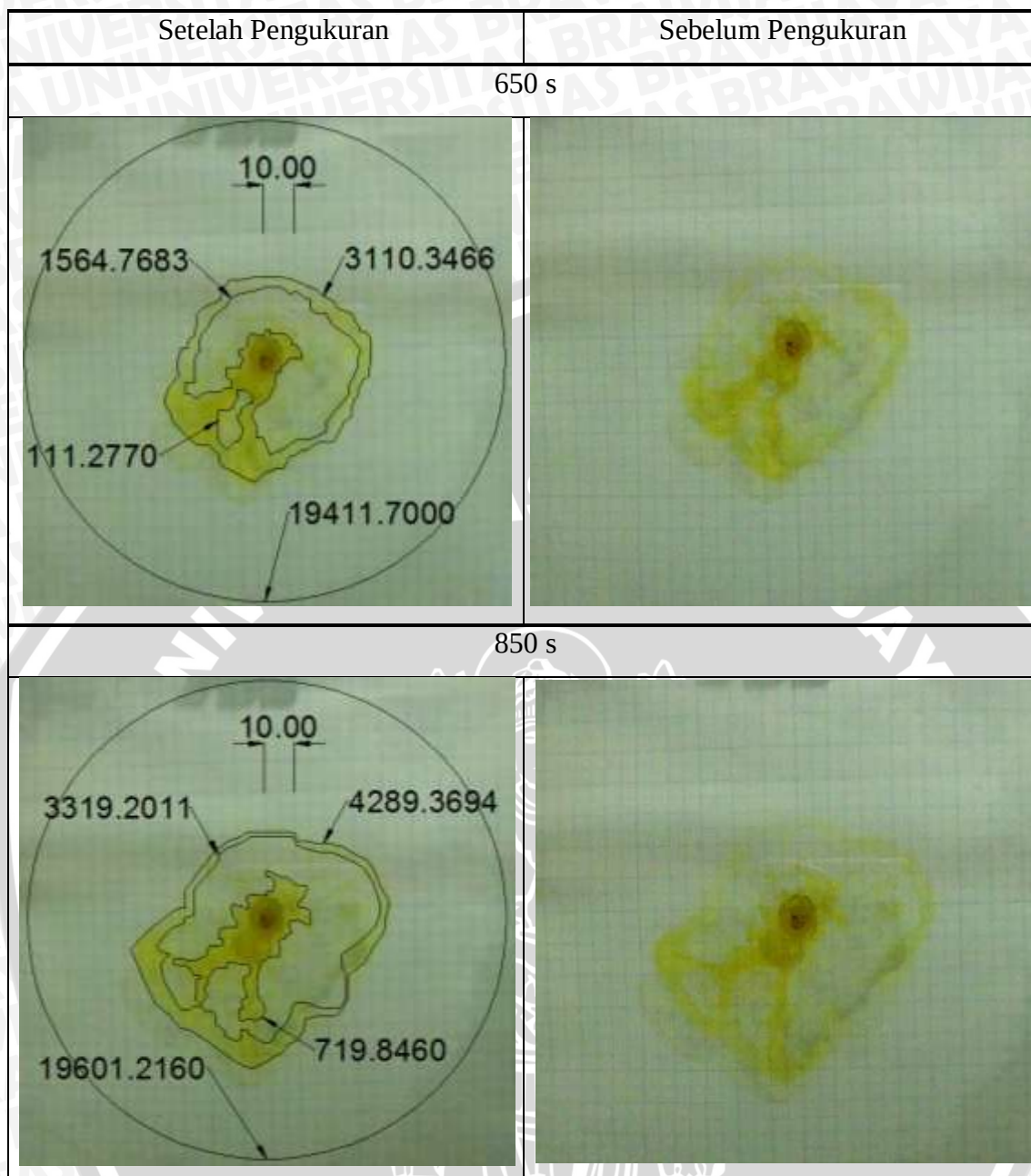
Setelah Pengukuran	Sebelum Pengukuran
8 s	
 Diagram of a circular object with a diameter of 10.00. The outer radius is labeled R12.01 and the inner radius is labeled R6.00.	 Photograph of a circular object before measurement.
10 s	
 Diagram of a circular object with a diameter of 10.00. The outer radius is labeled R13.96 and the inner radius is labeled R6.66.	 Photograph of a circular object after measurement.

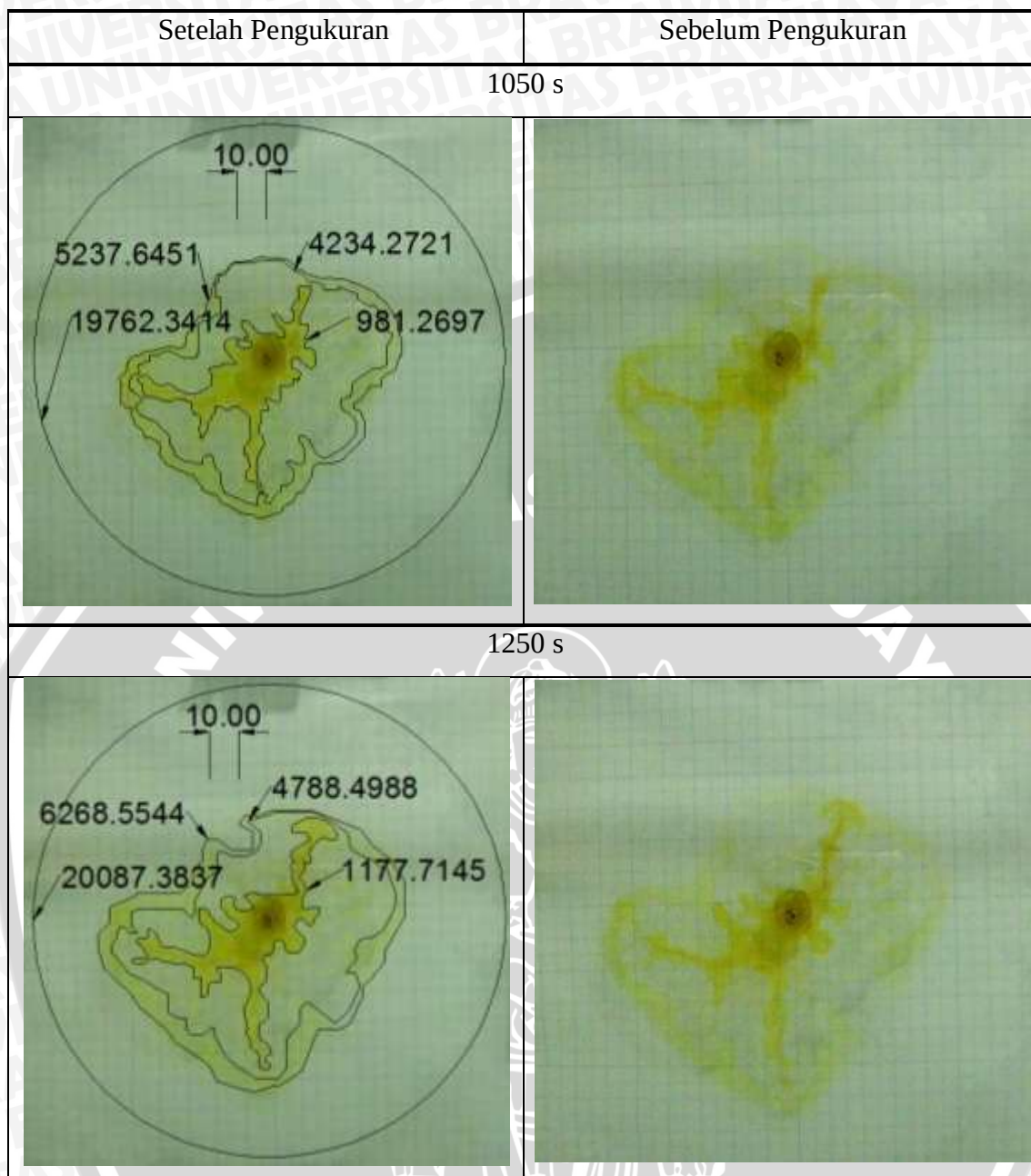
Lampiran 10. Keliling bidang kontak campuran gliserin, asam sulfat dan asam nitrat pada akhir penginjeksian $t = 10$ detik

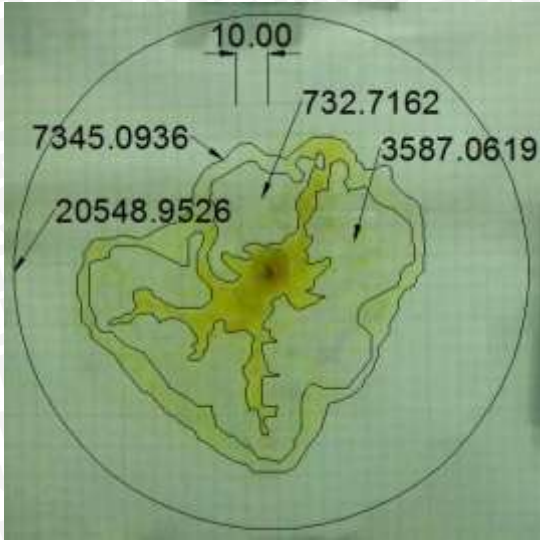
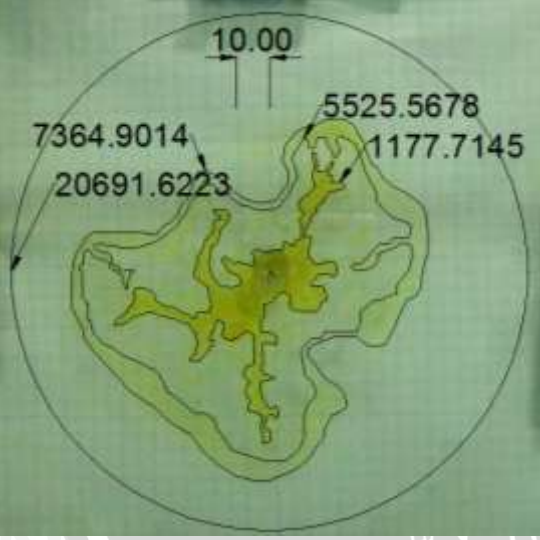
Cara	Visualisasi Setelah Pengukuran	Visualisasi Sebelum Pengukuran
Gliserin + Asam Nitrat Diinjeksi Asam Sulfat		
Gliserin + Asam Sulfat Diinjeksi Asam Nitrat		
Gliserin Diinjeksi Asam Nitrat + Asam Sulfat		

Lampiran 11. Visualisai pembentukan *interfacial instability* (viscous finger) dalam *hele shaw cell* gliserin + asam nitrat diinjeksi asam sulfat

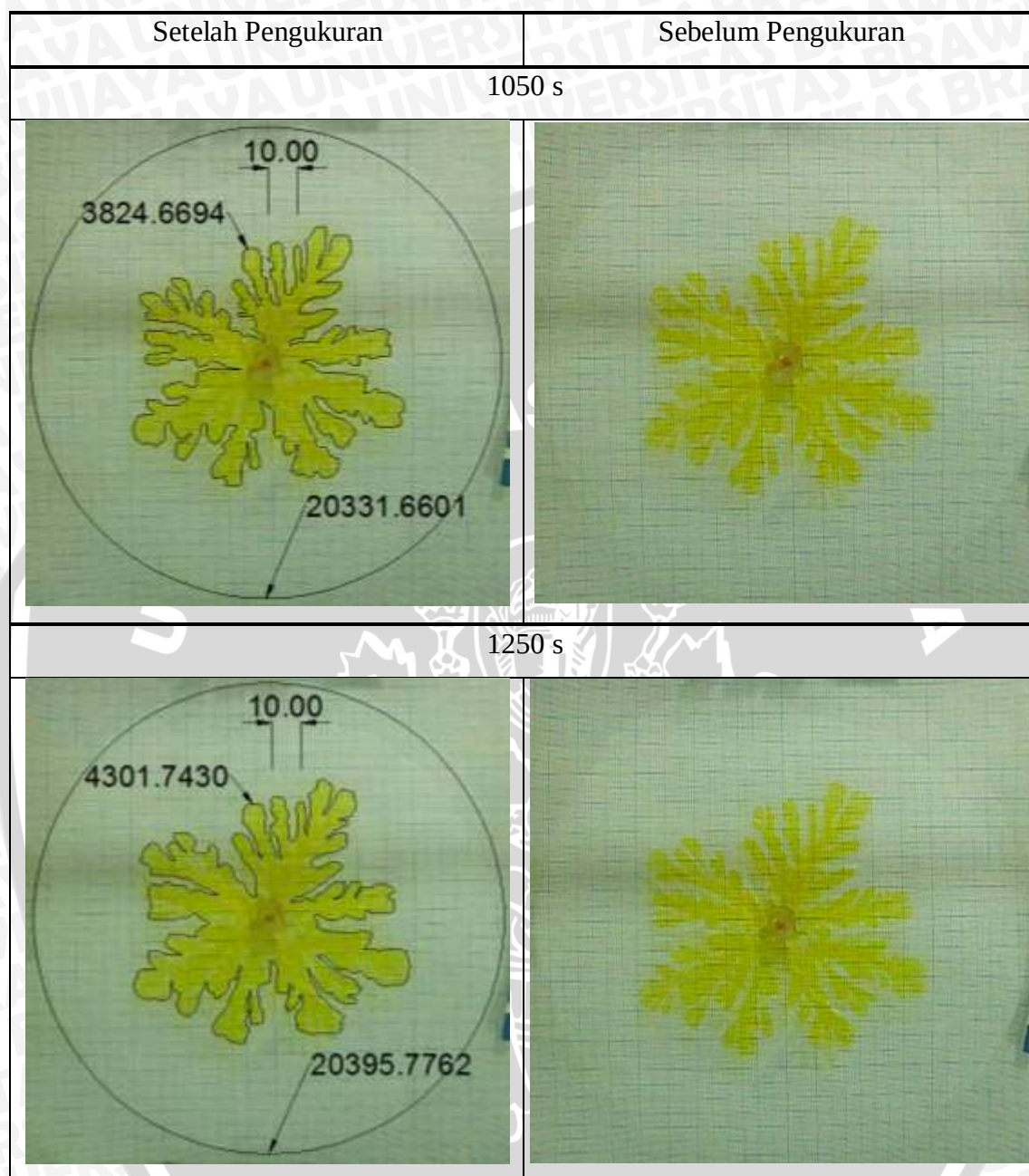


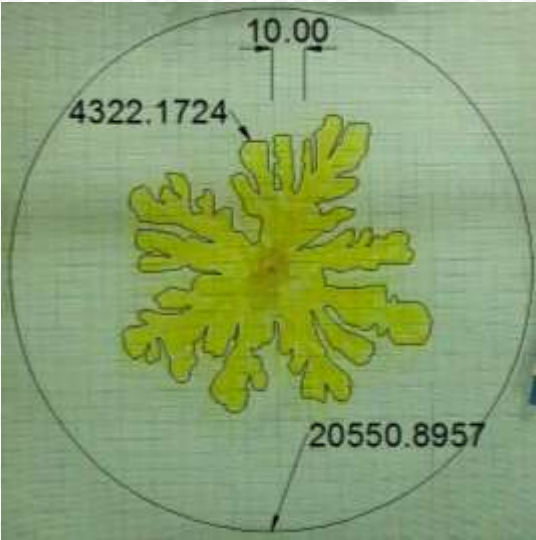
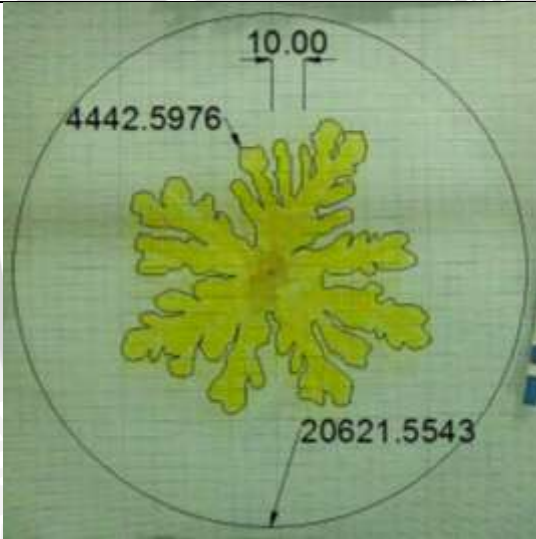
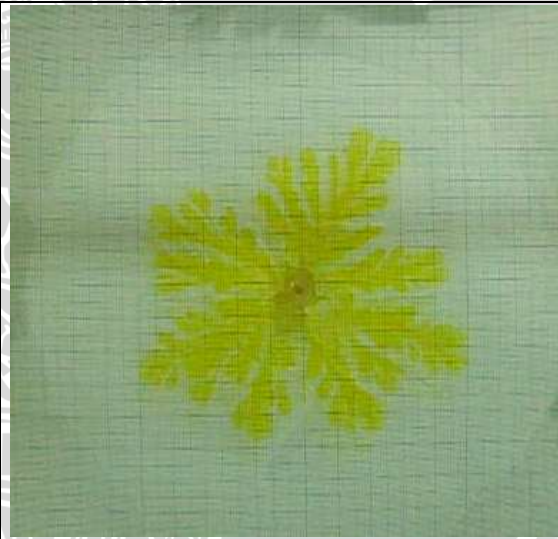




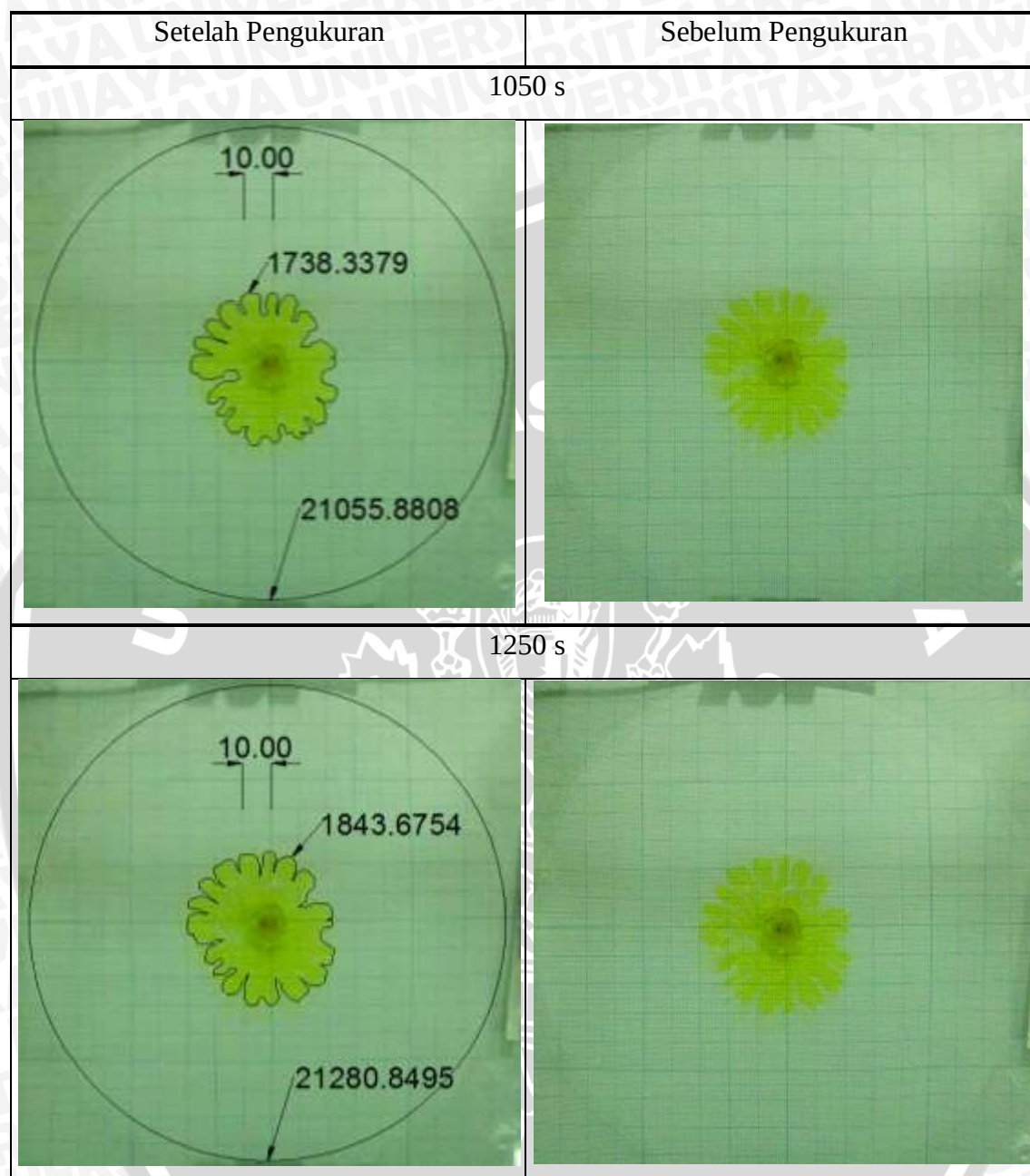
Setelah Pengukuran	Sebelum Pengukuran
1450 s	
	
1650 s	
	

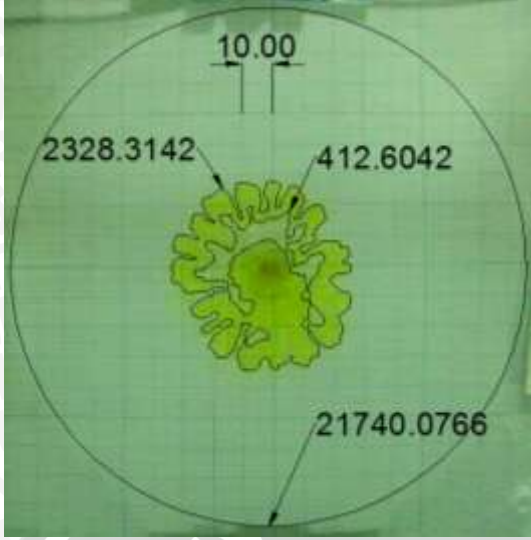
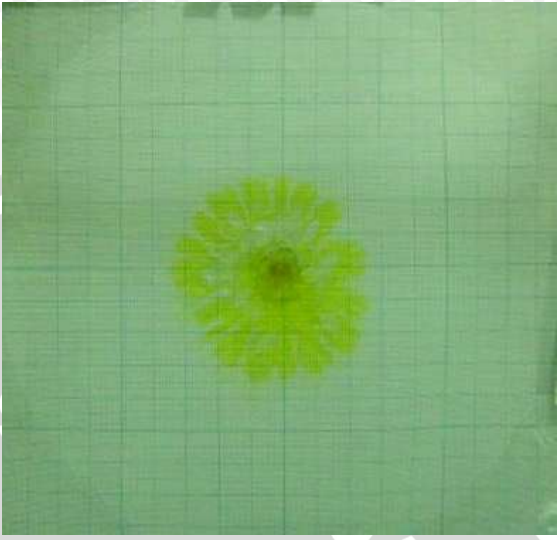
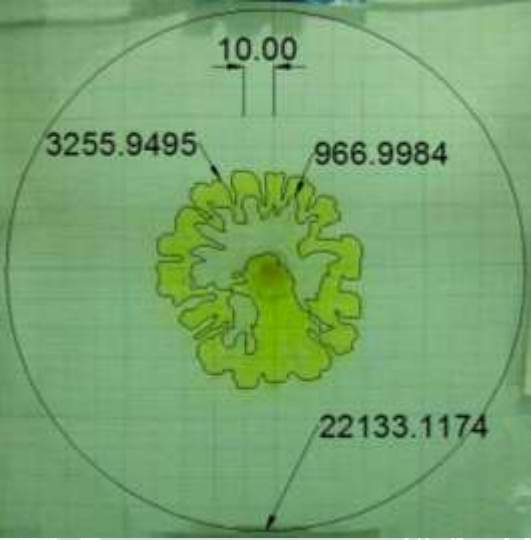
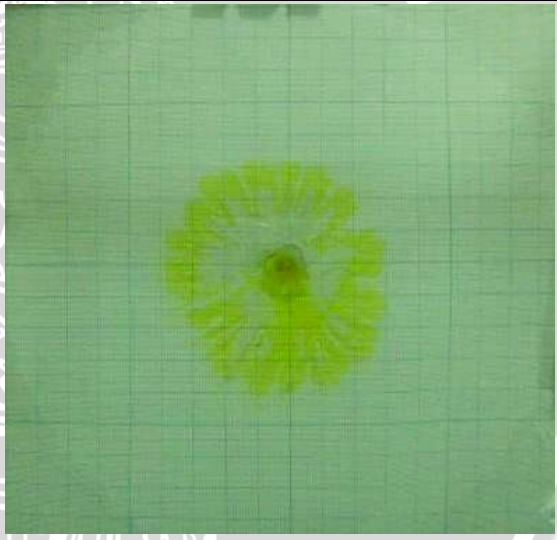
Lampiran 12. Visualisasi pembentukan *interfacial instability* (viscous finger) dalam *hele shaw cell* gliserin + asam sulfat diinjeksi asam nitrat



Setelah Pengukuran	Sebelum Pengukuran
1450 s	
	
1650 s	
	

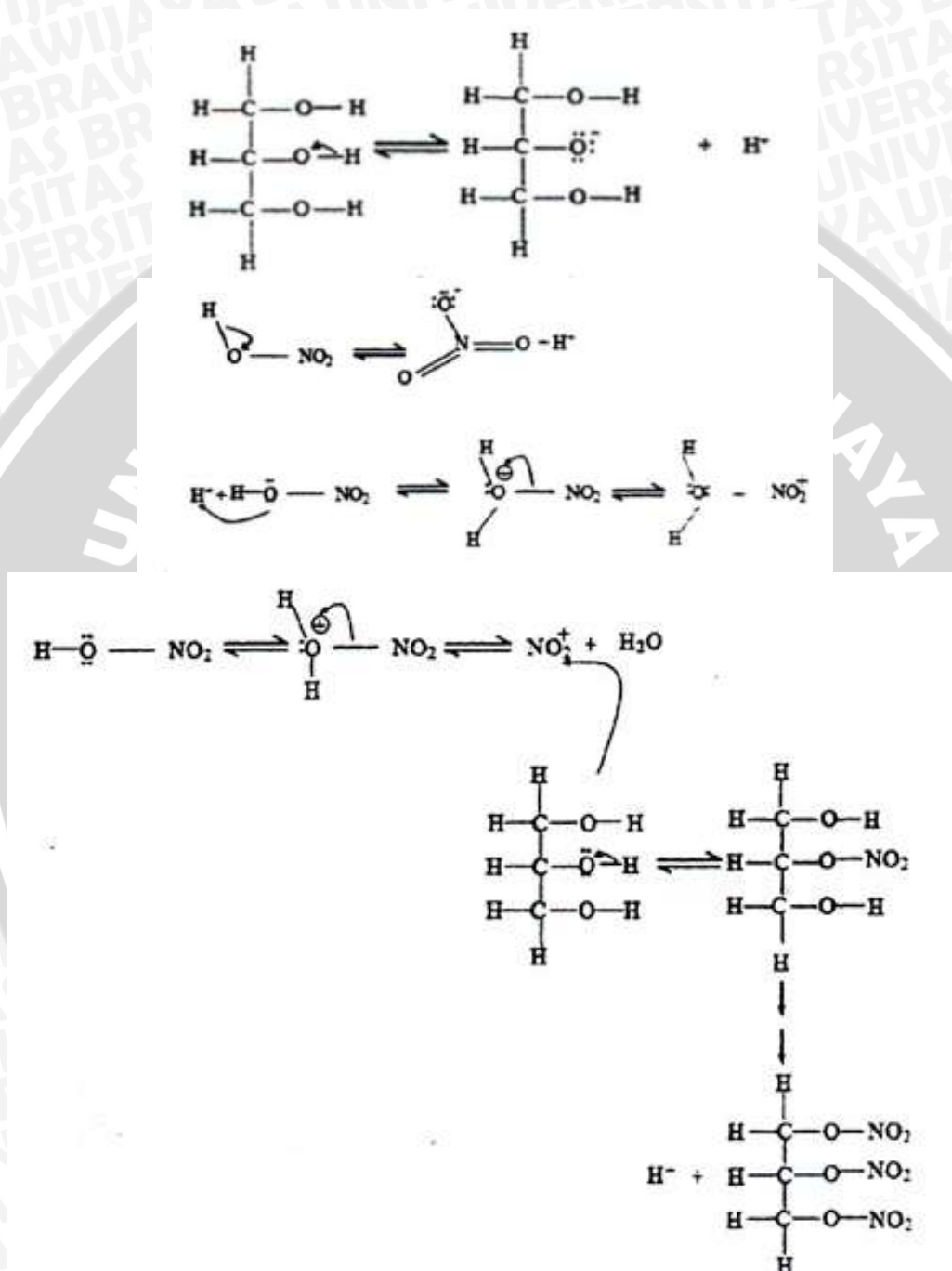
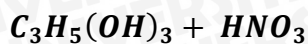
Lampiran 13. Visualisasi pembentukan *interfacial instability* (*viscous finger*) dalam *hele shaw cell* gliserin diinjeksi asam nitrat + asam sulfat



Setelah Pengukuran	Sebelum Pengukuran
1450 s	
	
1650 s	
	

Lampiran 14. Reaksi kimia pencampuran gliserin + asam nitrat, gliserin + asam sulfat dan asam nitrat + asam sulfat

1. Gliserin + Asam Nitrat



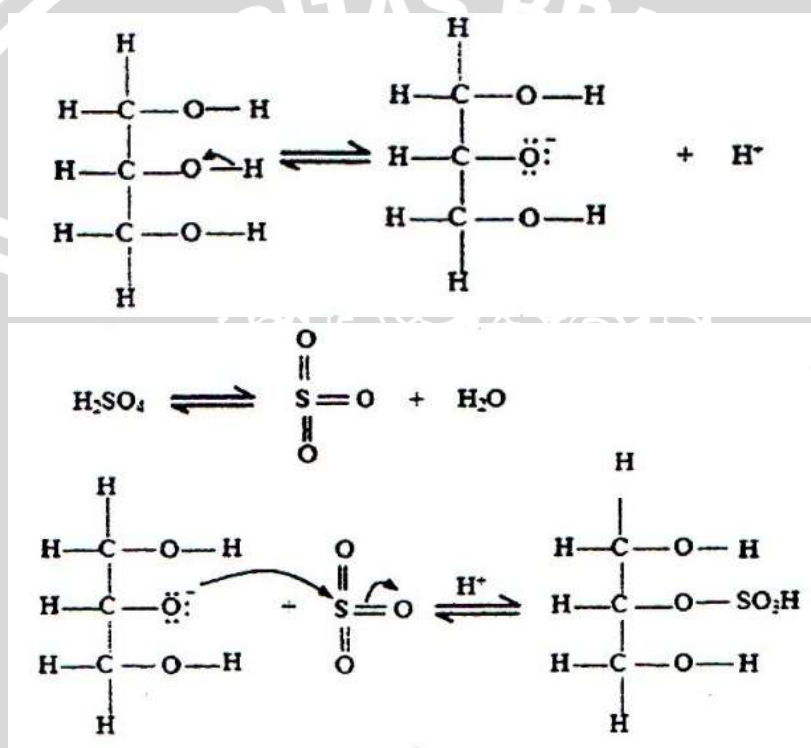
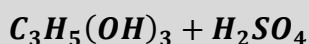
Gambar : Mekanisme reaksi $C_3H_5(OH)_3 + HNO_3$

Sumber : Santoso (2011 : 38)

Pada mekanisme diatas, $C_3H_5(OH)_3$ akan terurai menjadi $C_3H_5(OH)_3^- + H^+$ sedangkan pada HNO_3 juga terurai menjadi $NO_2^+ + OH^-$. Sesaat ketika kedua bahan kimia ini dicampurkan akan terbentuk air dari pertemuan antara ion $H^+ + OH^-$ dimana pembentukan air

ini akan menyebabkan reaksi pembentukan nitrogliserin akan berjalan lebih lambat serta akan membuat viskositas larutan akan semakin encer. Efek dari terurainya ion NO_2^+ dari asam nitrat akan menjadi sangat radikal bila bertemu dengan ion $C_3H_5(OH)_3^-$. Itulah mengapa saat kedua ion bertemu akan membentuk nitrogliserin $C_3H_5(ONO_2)_3$. Meskipun pada larutan ini akan terbentuk produk nitrogliserin $C_3H_5(ONO_2)_3$, namun proses pembentukannya sangatlah lambat serta membutuhkan waktu yang relatif lebih lama. Untuk itu, diperlukan suatu katalisator untuk mempercepat terjadinya reaksi antara kedua larutan tersebut salah satunya H_2SO_4 .

2. Gliserin + Asam Sulfat



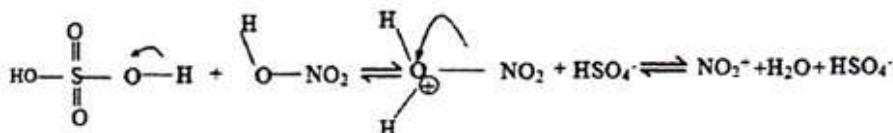
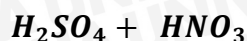
Gambar : Mekanisme reaksi $C_3H_5(OH)_3 + H_2SO_4$

Sumber : Santoso (2011 : 36)

Pada larutan $C_3H_5(OH)_3$ akan terurai menjadi $C_3H_5(OH)_3^- + H^+$ sedangkan pada H_2SO_4 juga terurai menjadi $SO_3 + H_2O$. Sesaat ketika lihat bahwasannya pada reaksi ini pembentukan air bukan dari pertemuan antara ion $H^+ + OH^-$ namun langsung dari pemecahan H_2SO_4 . Setiap pembentukan air ini akan menyebabkan reaksi pembentukan nitrogliserin akan berjalan lebih lambat serta akan membuat viskositas larutan akan semakin encer yang membedakan jumlah volume air yang dihasilkan dari setiap cara pencampuran larutan tersebut. Terbentuknya ion $C_3H_5(OH)_3^-$ dari gliserin akan mengikat ion positif yang ada di sekelilingnya sehingga pada mekanisme diatas $SO_3 + H^+$ akan berikatan dengan $C_3H_5(OH)_3^-$ menjadi $C_3H_5(OSO_3H)_3$. Terbentuknya $C_3H_5(OSO_3H)_3$ merupakan penyebab terjadinya percepatan

reaksi karena pembentukan produk ini akan memicu terjadinya energy aktivasi yang lebih awal jika dibandingkan dengan reaksi yang lain, sehingga proses diffuse yang terjadi antar larutan akan semakin berjalan lebih cepat.

3. Asam Sulfat + Asam Nitrat

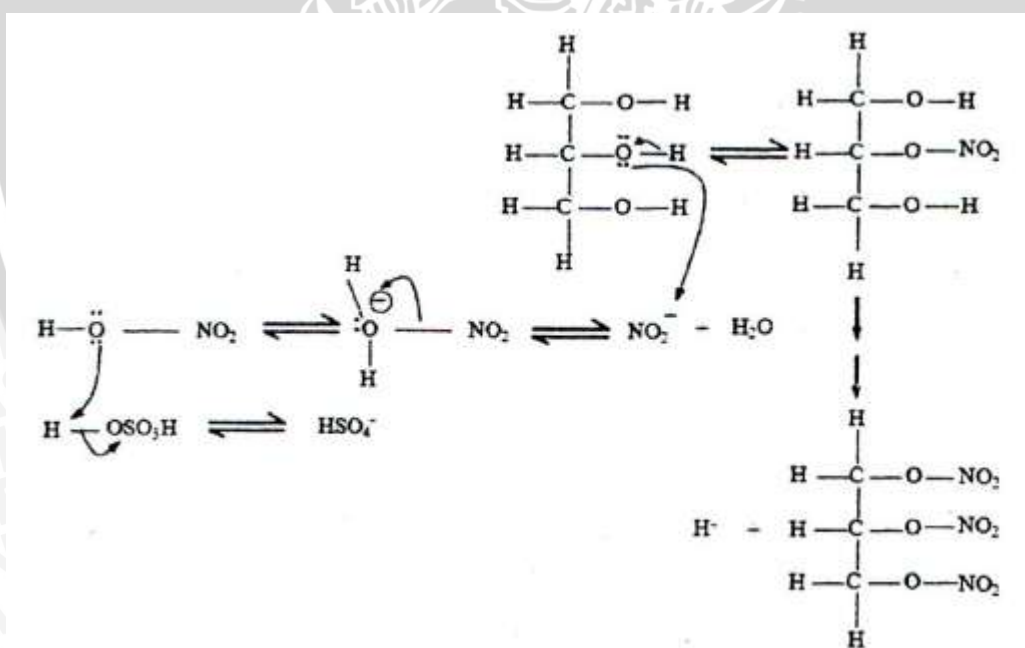


Gambar : Mekanisme reaksi $H_2SO_4 + HNO_3$

Sumber : Santoso (2011 : 40)

Pencampuran $H_2SO_4 + HNO_3$ akan menyebabkan pemisahan ion H^+ dari asam sulfat dan OH^- dari asam nitrat sehingga ketika larutan ini dicampurkan akan menghasilkan ion NO_2^+ dan HSO_4^- serta efek samping yang berupa H_2O .

4. Gliserin + Asam Sulfat dan Asam Sulfat + Asam Nitrat



Gambar : Mekanisme reaksi gliserin + asam sulfat dan asam sulfat + asam nitrat

Sumber : Santoso (2011 : 31)

Saat pencampuran gliserin, asam nitrat dan asam sulfat akan ada 3 kemungkinan proses pencampuran yaitu gliserin dan asam nitrat, gliserin dan asam sulfat serta asam nitrat dan asam sulfat. Pada mekanisme kali ini hasil dari reaksi sebelumnya yaitu H_2SO_4

akan terurai menjadi HSO_4^- dan H^+ sedangkan NO_2^+ dan OH^- dimana akan terjadi pembentukan H_2O dari ion $H^+ + OH^-$. Proses pembentukan nitrogliserin terjadi saat ada pertemuan antara $C_3H_5(OH)_3$ dan NO_2^+ . Kemudian untuk membuktikan bahwa asam sulfat pada pencampuran ini hanya berfungsi sebagai katalisator yaitu dengan memanfaatkan ion penguraian dari gliserin (ion H^+) yang akan berikatan kembali dengan ion dari penguraian asam sulfat (ion HSO_4^-) sehingga membentuk kembali H_2SO_4 .

